



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



DISSERTATION

Automatische Trennvorrichtung für Güterwagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing. Christoph Zellner, MSc

Matr.Nr.: 1529352

unter der Leitung von

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Egger

TU Wien, Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik (E307)

begutachtet von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Kartnig

TU Wien, Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik (E307)

und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler

RWTH Aachen, Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei meiner Dissertation und im Forschungsprojekt unterstützt haben. Besonders möchte ich mich bei Dr. Burkhard Stadlmann bedanken, der mich allzeit unterstützte und zur Seite stand, ohne ihn wäre diese Dissertation nicht zustande gekommen. Ebenso möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Martin Egger herzlich bedanken, der mich ständig unterstützte und mit vielen wertvollen Anregungen und Diskussionen zur Seite stand.

Ich danke auch Dr. Georg Kartnig und Dr. Christian Schindler für die Unterstützung, das wertvolle Feedback und die Begutachtung meiner Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Projektmitarbeitern (Mathias Hattinger, Martin Pachler,...) und Projektpartnern (ÖBB, AIT, FH St.Pölten, Ulbrich) bedanken. Nur durch die enge und gute Zusammenarbeit war die Entwicklung und Realisierung möglich. Speziell bei allen ÖBB-Mitarbeitern, die in diesem Projekt involviert waren, bedanke ich mich für die unkomplizierte Art der Zusammenarbeit und große Hilfsbereitschaft in jeglichen Belangen.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie und besonders bei meiner Frau Claudia Zellner, die mich tatkräftig auf meinem Weg unterstützt und immer zur Seite steht, von Herzen bedanken. Ohne euch hätte ich diesen Weg nicht gehen können.

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht. Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

.....

Ing. Christoph Zellner, MSc

Neukirchen an der Enknach, 4.2019

KURZFASSUNG

Durch die Verwendung der in die Jahre gekommenen Schraubenkupplung sind die für den Betrieb des Eisenbahn-Güterverkehrs notwendigen Abläufe sehr zeit- und arbeitsintensiv. Da eine flächendeckende Einführung von automatischen Kupplungen in Europa bis heute gescheitert ist, setzte sich das von FFG und BMVIT „Mobilität der Zukunft“ geförderte Projekt EntKuRo (Entkupplungsroboter) zum Ziel, geeignete Lösungen für die automatisierte Trennung der Schraubenkupplung (Langmachen und Entkuppeln) zu finden. Die Umsetzung erfolgte in einer Kooperation von Fachhochschule Oberösterreich (FH OÖ, Wels), Austrian Institute of Technology (AIT), Fachhochschule St.Pölten (FH StP), Österreichische Bundesbahnen (ÖBB) und Fa. Ulbrich.

Es werden bereits bestehende Lösungen recherchiert und die Gründe analysiert, weswegen bis heute kein praktischer Einsatz erfolgte. Bereits vor über 30 Jahren wurden unterschiedliche Patente entwickelt, mit denen entweder einzelne oder alle notwendigen Abläufe der Trennung der Schraubenkupplung automatisierbar waren. Allerdings scheiterte eine praktische Realisierung mutmaßlich an der Wirtschaftlichkeit der Anlagen, dem Gefahrenpotential für die Arbeitnehmer sowie der Leistungsfähigkeit der zur Zeit der Entwicklung verfügbaren Recheneinheiten und Sensoren.

Auf Basis der Analyse bestehender Lösungen, der Analyse der Prozesse und Abläufe am Verschiebebahnhof sowie der geometrischen Gegebenheiten werden in Anlehnung an VDI 2221 und VDI 2225 Konzepte entwickelt, die eine automatische Trennung der Schraubenkupplung ermöglichen. Der Fokus liegt primär auf einer einfachen und robusten Funktionsweise sowie auf einer einfachen Integrierbarkeit in die bestehenden Prozesse.

Für den Betrieb der entwickelten Konzepte ist neben einer funktionierenden Mechanik ebenso eine robuste und leistungsfähige Sensorik, mit geeigneten Algorithmen zur Datenauswertung, von entscheidender Bedeutung. So ist zum Beispiel ohne die Erkennung und die Positionsbestimmung der Schraubenkupplung eine automatische Trennung unmöglich. Für die zu ermittelnden Informationen werden verschiedenste Sensoren überprüft und bewertet sowie mit eigens implementierten Algorithmen auf ihre Einsetzbarkeit untersucht. Unter anderem wird die Eignung von Kreuzkorrelation, Lichtschnitt, Radar und neuronalen Netzen geprüft.

Die entwickelten Konzepte werden zuerst im Labor auf ihre Tauglichkeit hin untersucht und in weiterer Folge am Verschiebebahnhof Linz unter realen Bedingungen an Güterwagen getestet.

ABSTRACT

The majority of freight wagons in Europe still use the outdated screw coupling (invented over 150 years ago). Therefore necessary operation processes at the marshalling yards are very time-consuming and labour-intensive. Automatic alternatives to fasten the operation processes exists, but a european-wide usage has failed until today. Hence the project EntKuRo (uncoupling robot), funded by FFG and BMVIT „Mobilität der Zukunft“, has the goal of finding suitable solutions for an automatic separation of the screw coupling (loosening the coupling and uncoupling). The implementation took place in a cooperation of the University of Applied Sciences Upper Austria (FH OÖ, Wels), Austrian Institute of Technology (AIT), University of Applied Sciences St.Pölten (FH StP), Austrian Federal Railways (ÖBB) and the company Ulbrich.

Existing solutions are researched and the reasons why no practical application has taken place are analysed. Already more than 30 years ago different patents were developed, which could automate single parts of the separation or the whole separation process. However, a practical realisation presumably failed due to the economic efficiency of the systems, the hazard potential for the employees as well as the performance of the computing units and sensors available at the time of development.

Based on the analysis of existing solutions, the analysis of the processes as well as the geometric conditions, concepts which enables an automatic separation of the screw coupling are developed on the basis of VDI 2221 and VDI 2225. The focus is primarily on a simple and robust functionality as well as on an easy integration into the existing processes.

For the operation of the developed concepts a functional mechanic as well as a robust and powerfull sensor system with suitable algorithms for data evaluation is of decisive importance. For example, automatic separation is impossible without a detection and a localisation of the screw coupling. Various sensors are checked and evaluated for the information to be determined and their applicability is examined with specially implemented algorithms. Among other things, the suitability of cross-correlation, light section, radar and neural networks is checked.

The developed concepts are first examined in the laboratory for their applicability and then tested on freight wagons at the marshalling yard in Linz under real conditions.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Problembeschreibung und Motivation	7
1.3	Forschungsfragen	12
1.4	Methodik	13
2	Bestehende Lösungsansätze zum automatischen Trennen von Güterwagen	15
2.1	Überblick über existierende Lösungsansätze	15
2.2	Analyse ausgewählter Patente	17
2.2.1	DE 3344979 C2 / EP 0144619 A2 (Rangieranlage für Schienenfahrzeuge, 1983)	17
2.2.2	DE 3819388 A1 (Einrichtung und Verfahren zum automatischen Trennen von Güterwagen mit Schraubenkupplungen, 1988)	21
2.2.3	DE 4015878 A1 (Einrichtung zum vollautomatischen Trennen von Güterwagen mit automatischen Kupplungen, 1990)	24
2.2.4	DE 19621651 C2 (Vorrichtung zum Abkuppeln von Schienenfahrzeugen, 1996)	27
2.2.5	Sondierungsstudie (EP 3095665 B1, EP 3095666 B1)	28
2.2.6	Zusammenfassende Erkenntnisse	31
3	Analyse der bestehenden Abläufe und Gegebenheiten	33
3.1	Analyse der Prozesse des bestehenden Systems	33
3.2	Analyse der geometrischen Gegebenheiten	37
3.2.1	Räumliche Verhältnisse	37
3.2.2	Schraubenkupplung	44
3.2.3	Bremsschläuche	49
4	Rahmenbedingungen für das automatische Trennen	51
4.1	Bestimmung der notwendigen Parameter	53
4.2	Abschätzung des erreichbaren Automatisierungsgrades	54
4.3	Grundlegende und abschätzende Berechnungen sowie Annahmen	57
4.3.1	Langmachen	57

4.3.2	Entkuppeln	58
4.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	64
4.4.1	Langmachen	64
4.4.2	Entkuppeln	66
4.5	Anforderungen an die automatische Trennvorrichtung	67
4.5.1	Allgemeine Anforderungen	67
4.5.2	Anforderungen an Arbeitnehmerschutz und Sicherheit	69
4.5.3	Anforderungen an Wartung und Betrieb	69
4.5.4	Anforderungen für das Langmachen	70
4.5.5	Anforderungen für das Entkuppeln	71
4.6	Anforderungsliste	72
5	Lösungsprinzipien für die Mechanik	75
5.1	Methoden zur Lösungsfindung	76
5.2	Lösungskonzepte Langmachen	77
5.2.1	Wirkprinzipien: Trennvorrichtung antreiben	77
5.2.2	Wirkprinzipien: Bremsschläuche öffnen	77
5.2.3	Wirkprinzipien: Kupplungsschwengel positionieren	78
5.2.4	Wirkprinzipien: Schraubenkupplung aufschrauben	79
5.2.5	Wirkstrukturen: Langmachen	80
5.2.6	Auswahl geeigneter Wirkstrukturen	83
5.3	Lösungskonzepte Entkuppeln	84
5.3.1	Wirkprinzipien: Trennvorrichtung antreiben	84
5.3.2	Wirkprinzipien: Trennvorrichtung positionieren	84
5.3.3	Wirkprinzipien: Schraubenkupplung fassen	85
5.3.4	Wirkprinzipien: Schraubenkupplung anheben	85
5.3.5	Wirkstrukturen: Entkuppeln	86
5.3.6	Auswahl geeigneter Wirkstrukturen	88
5.4	Detaillierung der Lösungskonzepte für das Langmachen	89
5.4.1	Langmachen: Lösungskonzept 1 (LkL1)	89
5.4.2	Langmachen: Lösungskonzept 2 (LkL2)	91
5.4.3	Langmachen: Lösungskonzept 3 (LkL3)	92
5.5	Detaillierung der Lösungskonzepte für das Entkuppeln	93
5.5.1	Entkuppeln: Lösungskonzept 2 (LkE2)	93
5.5.2	Entkuppeln: Lösungskonzept 3 (LkE3)	95
5.5.3	Entkuppeln: Lösungskonzept 4 (LkE4)	96
5.6	Technische und wirtschaftliche Bewertung	97
5.7	Finales Konzept: Langmachen	99

5.8	Finales Konzept: Entkuppeln	99
5.8.1	Mechanisches Modell für den Entkupplungsmechanismus	100
6	Lösungsprinzipien für die Sensorik	105
6.1	Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung	107
6.1.1	Lichtschranke	107
6.1.2	Radsensor	109
6.1.3	Radar	109
6.1.4	Laserdistanzsensor	111
6.1.5	Farb- oder Graustufenkamera	112
6.1.6	Optische Komplettsysteme	113
6.1.7	Laser-surface-velocimeter	114
6.2	Sensoren zur Objekterkennung und Positionsbestimmung	115
6.2.1	Time-of-Flight Kamera	115
6.2.2	Laserscanner	118
6.3	Sensoren für die Ermittlung der Trennstellen	119
6.4	Bewertung der Sensoren	119
7	Algorithmen und Methoden für die Datenauswertung	123
7.1	Geschwindigkeitsbestimmung	123
7.1.1	Eindimensionale Kreuzkorrelation	123
7.1.2	Zweidimensionale Kreuzkorrelation	127
7.1.3	Radsensor	131
7.1.4	Radar	131
7.2	Objekterkennung und Positionsbestimmung	132
7.2.1	Lichtschnittverfahren	132
7.2.2	Klassische Methoden der Bilderkennung	133
7.2.3	Neuronale Netze	134
7.3	Sensorfusion	139
7.3.1	Das Kalman Filter	139
7.3.2	Das Kalman Filter im Entkupplungsprozess	141
7.4	Sensorreferenzierung	144
7.4.1	Referenzierung der ToF-Kamera	144
8	Test und Evaluierung der Trennvorrichtung	147
8.1	Labortests Langmachen	148
8.2	Feldtests Langmachen	151
8.3	Labortests Entkuppeln	153

8.4	Feldtests Entkuppeln	155
8.4.1	Testanordnung	155
8.4.2	Sensorik	156
8.4.3	Simulation und Messergebnisse	157
8.4.4	Verifikation	160
8.4.5	Validierung	160
8.4.6	Testergebnisse	161
9	Zusammenfassung und Ausblick	164

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 EINLEITUNG

Seit Jahrhunderten spielt die Eisenbahn weltweit eine wichtige Rolle im Personen- und Güterverkehr. In den Anfängen noch dampfbetrieben ist die Eisenbahn mittlerweile in weiten Teilen elektrifiziert. Im Personenverkehr sind neue Züge mit modernen und aktuellen Techniken für Betrieb und Reisekomfort (wie zum Beispiel WLAN oder automatischen Kupplungen) ausgerüstet. Demgegenüber steht der europäische Schienengüterverkehr, der sich heute noch Abläufen und Elementen bedient, die schon lange nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Eines dieser Elemente ist die Schraubenkupplung, die seit über 150 Jahren eingesetzt wird. Zur Veranschaulichung ist eine solche in Abbildung 1.1 und 1.2 dargestellt. Die Schraubenkupplung stellt die Verbindung zweier Güterwagen sicher und nimmt auftretende Zugkräfte auf. Parallel angeordnete Puffer zur Aufnahme der Druckkräfte komplettieren die Verbindung.

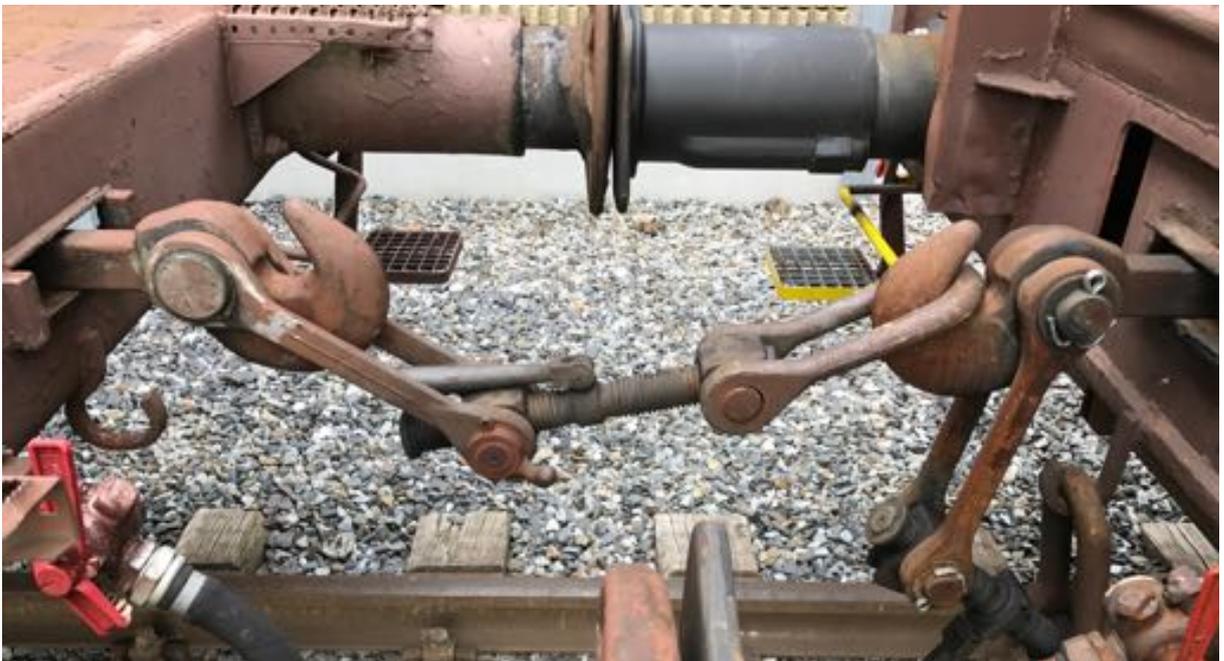


Abbildung 1.1: Schraubenkupplung und Puffer

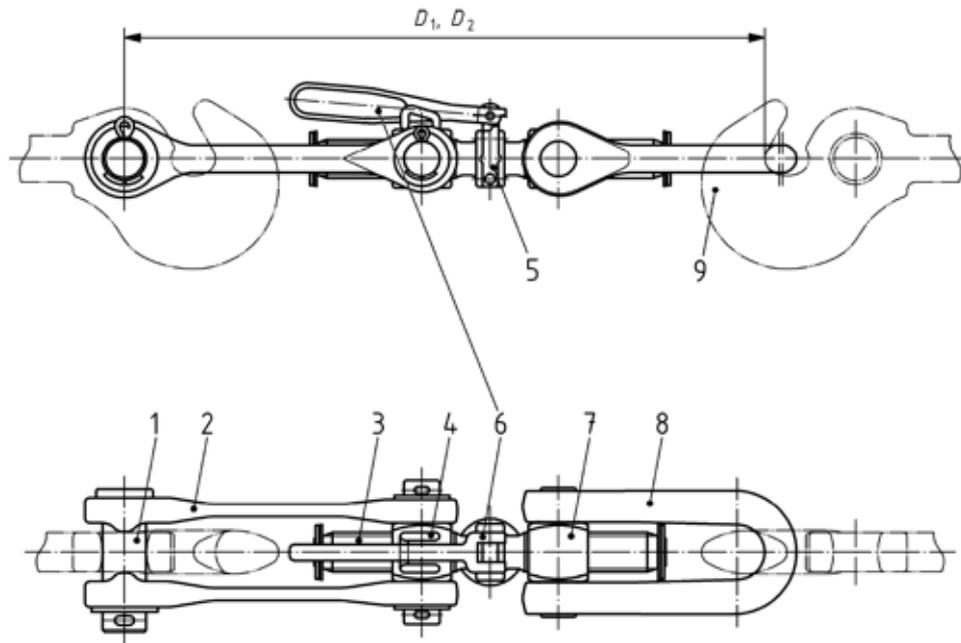


Abbildung 1.2: Standardschraubenkupplung [vgl. 1, S.14]

(1) Kupplungsbolzen	(7) Kupplungsmutter (bügelseitig)
(2) Kupplungslaschen	(8) Kupplungsbügel
(3) Kupplungsspindel	(9) Zughaken
(4) Kupplungsmutter (laschenseitig) mit Sicherungsauflage	D_1 maximale Länge bei vollständig ausgeschraubter Kupplung (~986mm)
(5) Kupplungsschwengelhalter	D_2 minimale Länge bei vollständig zusammen geschraubter Kupplung (~750mm)
(6) Gelenkiger Kupplungsschwengel	

„Der anhaltende Einsatz der SK [Schraubenkupplung] bringt Probleme und Einschränkungen mit sich. So erfordert das Kuppeln und Entkuppeln der Fahrzeuge einen sehr hohen manuellen Aufwand, der unter teilweise sehr ungünstigen Verhältnissen, einem hohen Gefahrenpotenzial für die Rangierer [Mitarbeiter am Verschiebebahnhof, auch Verschieber] und hohem körperlichen Einsatz erfolgt. Ihre vergleichsweise geringe Zug- und Längsdruckkraft setzt den möglichen Zugdimensionen (Länge und Masse) in Europa enge Grenzen.“ [2, S.17] Ebenso nachteilig wirkt sich die immer kostenaufwendigere Wartung und Schmierung von Puffern und Schraubenkupplungen sowie der Verschleiß der Pufferteller aus. Teilweise müssen (bei jeder Revision) alle sechs Jahre neue Puffer angebaut werden. [vgl. 3, S.8]

Durch die Verwendung der Schraubenkupplung ergeben sich folgende Nachteile:

- Hoher manueller Aufwand \Rightarrow zeitintensive Rangiervorgänge
- Hohes Gefahrenpotential für Verschieber
- Bremsschläuche (zur Druckluftversorgung) müssen zusätzlich gekuppelt werden
- Keine Strom- und Datenleitungen vorhanden
- Eingeschränkte Zugdimensionen
- Kostenaufwändige Wartung

[vgl. 4, S.136]

Bereits in den 1890er Jahren wurde in den USA eine automatische Mittelpufferkupplung (Janney-Kupplung) eingeführt, mit Vorteilen hinsichtlich Automatisierung und der Bewältigung höherer Anhängelasten [vgl. 5, S.31]. Ebenso konnte sich die Mittelpufferkupplung in Japan (1925), der Sowjetunion (1935 - 1957), China und Indien (nach 1945) durchsetzen, nur nicht in den Staaten Europas [vgl. 6, S.107]. Im Laufe der folgenden Jahrzehnte kam es zur Entwicklung weiterer Systeme, wie die Zug-Druck-Kupplung Typ AK 69e und Intermat (1980er) durch den Internationalen Eisenbahnverband (UIC) und der Organisation für die Zusammenarbeit der Eisenbahnen (OSShD). Eine Einführung „[...] *scheiterte wirtschaftlich am hohen Preis und der damals unvermeidbaren Simultanumstellung. Eine darauf folgende Studie [im Jahr 1988] des ERRI [Forschungs- und Versuchsamt der UIC] schlug als einzig wirtschaftlich machbare automatische Kupplung eine reine Zug-Kupplung (Z-AK [Zug-Automatische Kupplung, dargestellt in Abbildung 1.3]) vor.*“ [7, S.222][vgl. 8][vgl. 9] Die Z-AK ist mit der Schraubenkupplung kompatibel, womit bei einer Einführung ein Mischbetrieb (durch die Gemischtzugkupplung, Abbildung 1.3) möglich wäre. Allerdings scheiterte die Einführung „[...] *an der mangelnden Finanzierungskraft und am fehlenden politischen Willen. Zudem war die vorgeschlagene technische Lösung [...] nicht überzeugend. Die Z-AK [...] konnte nur die Zugkraft übertragen und zugleich die Hauptluftleitungen automatisch kuppeln, für die Druckkraftübertragung sollten die Seitenpuffer beibehalten werden.*“ [6, S.70]

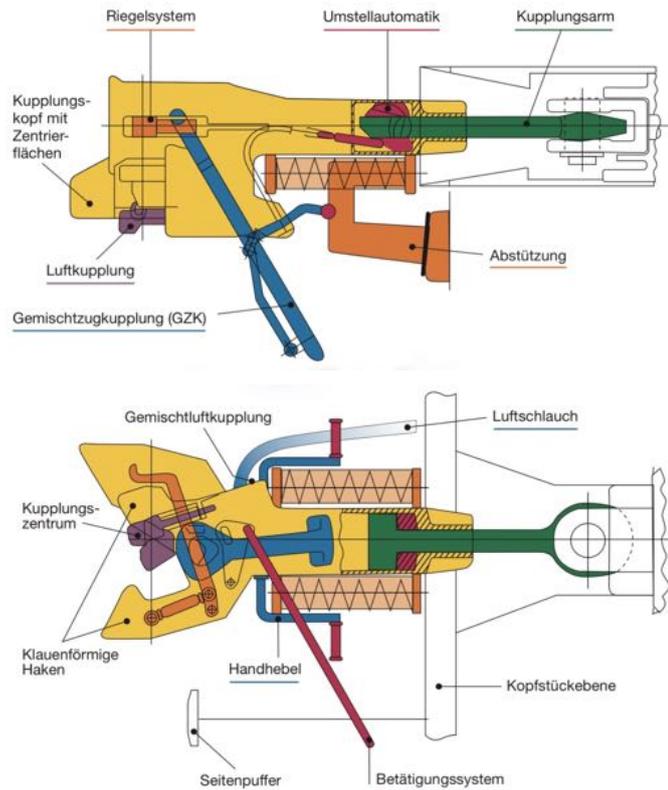


Abbildung 1.3: Systemskizze der Z-AK mit allen Komponenten [7, S.223]

In weiterer Folge kam es mit der C-AKv Kupplung (Compact - Automatische Kupplung vereinfacht) zu einer Weiterentwicklung. Über den Einsatz im Kohleverkehr [Den Einsatz der TRANSPAKT - Mittelpuffer-Kupplung (C-AKv) im Kohleverkehr, ETR 9/2006 zit. n. 6, 10], eine geringfügige Anzahl an Testmodellen und vereinzelt Anwendungen kam die C-AKv in Europa bis heute nicht hinaus. Durch einen Einsatz der C-AKv wären folgende Vorteile erreichbar:

- Nahezu kein manueller Aufwand ⇒ Beschleunigung des Rangiervorganges
- Sehr geringes Gefahrenpotential für Mitarbeiter
- Verdopplung der möglichen Zuglänge
- Mitkupplung von Druckluft und elektrischen Leitungen (inklusive Datenkanal)
- Kompatibilität zur Schraubenkupplung und zur russischen SA-3-Kupplung (Sowjetische Automatikkupplung, dritte Variante)
- Nach der Übergangsphase (Entfall der Seitenpuffer) höhere Entgleisungssicherheit bei höherer Fahrgeschwindigkeit

[teilw. vgl. 6, S.68f]

„Seit 1976 ist den europäischen nationalen Bahngesellschaften von der UIC in den UIC-Merkblättern vorgeschrieben, dass bei allen Neubauten von Güterwagons die statischen und konstruktiven Voraussetzungen für den nachträglichen Einbau der AK [automatische Kupplung] zu schaffen sind.“ [6, S.70]

Die Kosten für die Vorbereitung für einen späteren Einbau einer Mittelpufferkupplung betragen zirka 2000 Euro pro Güterwagen, wodurch bei einem Gesamtausmaß von ungefähr 500.000 bis 600.000 vorgerüsteter Güterwagen in Europa, bislang Kosten von zirka 1 bis 1,2 Milliarden Euro entstanden sind. Ein Teil dieser Wagen wurde mittlerweile wieder ausgemustert. Damit diese Vorbereitungskosten nicht zu einer Fehlinvestition werden, bedarf es nur politischen Willens. Mit diesem könnte der Einsatz der Mittelpufferkupplung forciert, beziehungsweise gesetzlich vorgeschrieben werden. [vgl. 6, S.70]

In Zukunft kann im europäischen Schienenverkehr mit einem deutlichen Anstieg der Verkehrsleistung gerechnet werden. Aufgrund knapper finanzieller Mittel und der wenigen oder nicht zur Verfügung stehenden freien Flächen in Ballungsräumen ist dieser Anstieg nicht allein durch extensiven Infrastrukturausbau zu kompensieren. [vgl. 5, S.31] Am Beispiel Deutschland ist nach allen Prognosen im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums mit einem starken Anstieg der Güterverkehrsleistung zu rechnen. Bis zum Jahr 2050 soll der Zuwachs der Güterverkehrsleistung der Schiene voraussichtlich +138 % (Ausgangsbasis: 2006/07) betragen. [vgl. 6, S.65] In diesem Sinne ist eine Modernisierung des Güterverkehrs dringend notwendig.

„Die in den letzten Jahrzehnten bei der Einführung von automatischen Mittelpufferkupplungen in Europa gemachten Erfahrungen zeigen, dass ein vollständiger und auf europäischer Ebene abgestimmter Umstellungsprozess von Schraubekupplung auf automatische Mittelpufferkupplung äußerst anspruchsvoll ist. Viele Akteure des europäischen Schienengüterverkehrs stehen daher einem weiteren Implementierungsversuch äußerst skeptisch gegenüber. Somit ist nicht davon auszugehen, dass auf absehbare Zeit ein neuer, zentral gesteuerter Anlauf für eine simultane, flächendeckende Einführung einer automatischen Mittelpufferkupplung in Europa unternommen wird.“ [11, S.47]

Aktuell beschäftigen sich Eisenbahnunternehmen zum Teil stark mit der Automatisierung des Bahnbetriebes und Innovationen für Güterwagen [vgl. 12, 13, 14, 15]. Besonders die SBB Cargo arbeitet zurzeit am Ein-Personen-Betrieb und hat bereits Ende 2017 die Pilotphase eines Demonstratorzuges mit automatischen Kupplungen abgeschlossen. Dabei wurden die Erwartungen zum Teil übererfüllt. [vgl. 14] *„[...] SBB Cargo [investiert] bis 2023 rund 90 Millionen Franken in die Automation: Neben der automatischen Kupplung und der automatischen Bremsprobe werden Informationssysteme den Kunden mehr Transparenz und Sendungsinformationen in Echtzeit bringen.“ [16, S.11]*

Die von SBB getesteten automatischen Kupplungen sind rein mechanisch und können auch die Druckluftleitungen der Wagenbremsen verbinden. Die Güterwagen werden durch ein Zusammenschieben gekuppelt (Geschwindigkeit: 0,6 bis 5 $\frac{km}{h}$), allerdings muss für das Entkuppeln ein Kabelzug manuell betätigt werden. Mit Anfang 2019 will die SBB Cargo einen Pilotversuch mit automatischer Kupplung und automatischer Bremsprobe an fünf Terminals des kombinierten Verkehrs starten. Dazu wurden 2018 bereits 105 Güterwagen mit einer automatischen Kupplung sowie 12 Streckenlokomotiven und 10 Rangierlokomotiven mit Hybridkupplungen ausgerüstet. [vgl. 16, S.16f]

Die an den Güterwagen verbauten automatischen Kupplungen sind augenscheinlich nicht mit der Schraubenkupplung kompatibel, wodurch ein Mischbetrieb nicht möglich ist. Lediglich die Hybridkupplung der Lokomotiven ist mit beiden Kupplungen kompatibel.

Eine automatische Kupplung ist zwingend notwendig, aber der Weg ist noch weit. Es fehlen bisher nicht nur technische Standards sondern auch eine Lösung zur Finanzierung. So tragen die Wagenhalter die Investitionskosten, aber die Vorteile liegen zu 95 % bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen. Dementsprechend ist der Zeitpunkt für eine flächendeckende Einführung der automatischen Kupplung noch in weiter Ferne. [vgl 15, S.24]

Aus diesem Grund ist nun die Entwicklung einer Trennvorrichtung zur automatischen Handhabung der Schraubenkupplung angedacht. Eine solche Trennvorrichtung wäre in der Lage folgende Vorteile im Zusammenhang mit der Schraubenkupplung zu ermöglichen:

- Beschleunigung des Rangiervorganges
- Gleiche Leistung bei allen Wetterlagen und zu jeder Uhrzeit
- Erhöhte Prozesssicherheit → keine Fehler durch Unachtsamkeit, ...
- Erhebliche Verbesserung von Arbeitnehmerschutz und Arbeitsbedingungen
- Automatisierter Ablauf → die Leistungsfähigkeit wird nur mehr durch die verwendeten Bauteile eingeschränkt
- Entlastung der Mitarbeiter → erhöhte Verfügbarkeit für andere Tätigkeiten

[vgl. 4, S.137]

1.2 PROBLEMBESCHREIBUNG UND MOTIVATION

Verschiebebahnhöfe (auch Rangierbahnhöfe) finden sich an wichtigen Knotenpunkten, strategisch verteilt innerhalb des Schienennetzes. Zum Beispiel befinden sich im deutschen Schienennetz neun Verschiebebahnhöfe sowie zirca 170 Knotenpunktbahnhöfe (Stand 2007) [Deutsche Bahn AG, zit. n. 6, S.99] und acht Verschiebebahnhöfe in Österreich [17]. Diese Bahnhöfe sind der Grundstein, ohne den ein Güterverkehr und im Besonderen der Wagenladungsverkehr (Einzelwagenverkehr) praktisch unmöglich wäre. Züge bestehen aus einer Vielzahl an Güterwagen, die ihrerseits wieder zu Wagengruppen zusammengefasst werden, mit unterschiedlichen Ursprüngen und Zieldestinationen. Die jeweiligen Güterwagen / Wagengruppen sind entsprechend ihrer Route immer wieder neu zu verbinden und aufzuteilen. „*Mindestens 14 Kupplungs-/Entkupplungsprozesse fallen pro Transportvorgang an (ohne Leerfahrten).*“ [6, S.105f]

Durch die Verschubtätigkeiten kommt es üblicherweise zu langen Transportzeiten der Güterwagen. So sind für die Rangierzeit, Wartezeit, Zu- und Ablaufzeit zu / von den Verschiebebahnhöfen zirca 10 bis 14 Stunden zu veranschlagen. [vgl. 6, S.101] Dies bedingt auch die in Fallstudien ermittelte durchschnittliche Systemgeschwindigkeit von $18 \frac{km}{h}$ [Marktstudie Schienengüterverkehr, SCI Verkehr GmbH, 2001 zit. n. 6, S.101]. „*Fazit: Die durchschnittliche Systemgeschwindigkeit des LKW gegenüber der des Einzelwagenverkehrs der Bahn ist drei- bis viermal schneller.*“ [6, S.101]

Hauptelemente eines Verschiebebahnhofes (Abbildung 1.4)

- Ein Verschiebebahnhof besitzt eine Vielzahl an Einfahrgleisen (Einfahrgruppe), auf die die Züge zu Beginn der Aufteilung und Neuordnung (Verschub) der Güterwagen abgestellt und für den Trennvorgang vorbereitet werden.
- Der Abrollberg (auch Ablaufberg) stellt einen kleinen Hügel dar, über den die getrennten Güterwagen zu schieben sind. Die Güterwagen beschleunigen nach der Bergkuppe durch das Gefälle und rollen so antriebslos weiter.
- In der Weichenzone erfolgt die Aufteilung der Güterwagen über verschiedene Weichen auf die zugeordneten Gleise der Richtungsgruppe.
- Auf den Gleisen der Richtungsgruppe (Abbildung 1.5) findet die Zugbildung nach den jeweiligen Zieldestinationen statt. Die getrennten Güterwagen werden hierzu wieder miteinander verbunden und die Fahrt zum Ziel fortgesetzt.
- Die neu gebildeten Züge verlassen über die Ausfahrgruppe den Verschiebebahnhof in Richtung Zielbahnhof. Die Ausfahrgruppe befindet sich im Anschluss an die Richtungsgruppe und besteht wiederum aus mehreren Gleisen.

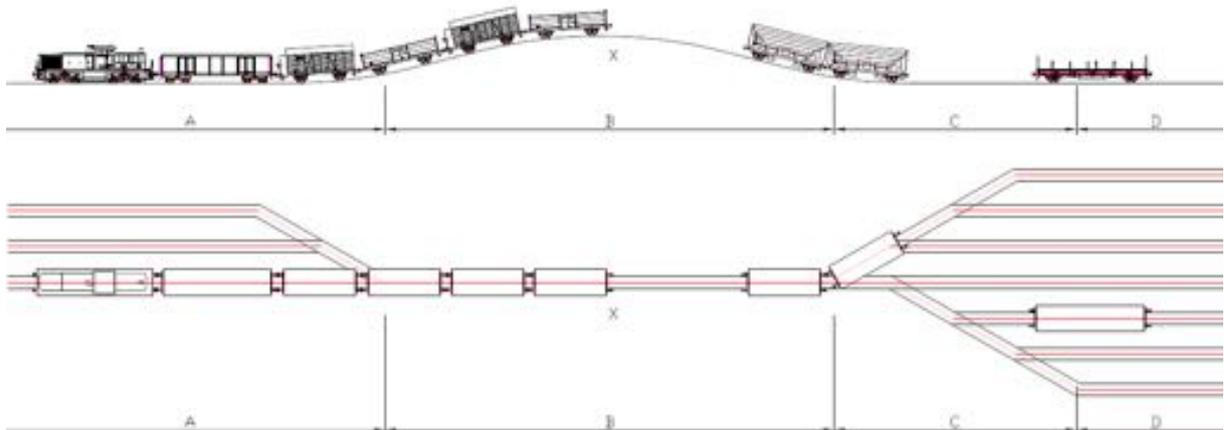


Abbildung 1.4: Schematische Skizze des Ablaufes am Abrollberg [18]

A...Berggleise (Einfahrgruppe), B...Abrollberg, C...Weichenzone, D...Talggleise (Richtungsgruppe)



Abbildung 1.5: Richtungsgruppe Zentralverschiebebahnhof Wien [19]

Eine Auswahl an Kenndaten des größten Verschiebebahnhofes Österreichs (Wien Zentralverschiebebahnhof) und des Verschiebebahnhofes Linz sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

	Wien Zentralverschiebebahnhof	Linz Verschiebebahnhof Ost
Anzahl Gleise Einfahrgruppe	15	17
Anzahl Gleise Richtungsgruppe	48	36
Anzahl Gleise Ausfahrgruppe	10	4
Züge pro Tag	140	-
Kapazität in 24h	bis zu 5500 Wagen	-

Tabelle 1.1: Daten der Verschiebebahnhöfe Wien und Linz [20], [21]

Anhand der Zieldestinationen der Güterwagen werden die Trennstellen (Schraubenkupplungen, die zu trennen sind) festgelegt. In einem ersten Schritt erfolgt von einem Verschiebemitarbeiter zuerst das Aufschrauben der Schraubenkupplung (Langmachen, Abbildung 1.6) von Hand am stehenden Zug. Weitere Tätigkeiten wie das Öffnen der Bremsschläuche finden im gleichen Arbeitsschritt statt. Rost und Vereisung erschweren das Langmachen sehr, wodurch der Mitarbeiter körperlich stark beansprucht wird. Zum Teil ist die Kupplungsspindel ohne zu Hilfenahme von Hilfsmitteln, wie Hebelverlängerungen oder Hammer, nicht zu lösen.

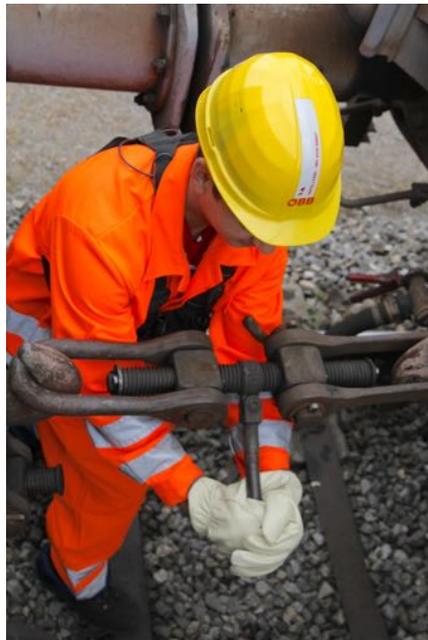


Abbildung 1.6: Aufschrauben der Schraubenkupplung [19]

Zur endgültigen Trennung der Güterwagen ist nachfolgend noch ein Aushängen der langgemachten Schraubenkupplungen aus den Zughaken (Entkuppeln) notwendig. In der Praxis kann dies auf unterschiedliche Art und Weise realisiert werden:

- Entkuppeln erfolgt unmittelbar im Anschluss an das Langmachen (zum Großteil in deutschen Verschiebebahnhöfen, in Österreich am Verschiebebahnhof Wels)
- Entkuppeln erfolgt während des Schiebens über den Abrollberg (außer in Wels an allen österreichischen Verschiebebahnhöfen)

Ersteres führt dazu, dass der Zug nur mehr geschoben werden kann, da eine physische Verbindung nur mehr durch die Puffer zwischen den getrennten Güterwagen besteht. Diese können allerdings nur Druckkräfte übertragen. Als wohl größter Nachteil dieser Methode kann die fehlende Bremsmöglichkeit der Güterwagen während des darauf folgenden Verschubs gesehen werden. Daher besteht diese Möglichkeit nur dort, wo freilaufende Güterwagen (ohne direkte Einflussmöglichkeit) durch Reibung von selbst abgebremst werden.

Zweiteres bietet, entgegen der ersten Variante, auch während des weiteren Verschubs noch die Möglichkeit die Güterwagen zu bremsen. Allerdings wird im Gegenzug dazu ein Aushängen der Schraubenkupplungen an fahrenden Güterwagen notwendig. Hierfür müssen die langgemachten Schraubenkupplungen von einem Vershubmitarbeiter am Abrollberg mit einer Eisenstange ausgehebelt werden (dargestellt in Abbildung 1.7). Dies ist mit deutlichem Abstand zur Kuppe des Abrollberges zu realisieren. Ansonsten kann es, bedingt durch noch verbundene Güterwagen, die bereits über die Bergkuppe hinweggefahren sind, zu einer Zugbelastung (Spannen) der Schraubenkupplung kommen und ein Entkuppeln ist dadurch nicht mehr möglich. Zusätzlich müssen für die Überprüfung der Wagenreihung und Trennstellen die Wagennummern kontrolliert werden.

In weiterer Folge schiebt ein Triebfahrzeug die getrennten Güterwagen über den Abrollberg. Nach dem Abrollberg rollen die Güterwagen frei und mit Hilfe von Weichen erfolgt die Aufteilung auf die verschiedenen Gleise der Richtungsgruppe, geordnet nach Zieldestination. Dort werden die Güterwagen wieder zu neuen Zügen verbunden.



Abbildung 1.7: Typische Wagenentkupplung am Abrollberg [19]

Das Trennen von Güterwagen setzt sich somit aus dem Langmachen und dem Entkuppeln zusammen, welche wiederum aus einzelnen Arbeitsschritten bestehen:

Langmachen

- Identifizierung der Trennstelle
- Betätigen des Lösezuges (lösen der Druckluftbremse)
- Schließen der Absperrhähne (für die Druckluftleitungen der Bremsen)
- Öffnen der Bremsschläuche
- Aufschrauben der Schraubenkupplung

Entkuppeln

- Identifizierung der langgemachten Schraubenkupplung
- Kontrolle der Trennstelle
- Aushängen der Schraubenkupplung

Auf eine Automatisierung des Schließens der Absperrhähne wird in Absprache mit ÖBB verzichtet. Im Trennprozess werden alle Druckluftleitungen entleert, dementsprechend kommt es durch offene Absperrhähne zu keinen Beeinträchtigungen. Wenn die Güterwagen in der Richtungsgruppe wieder verbunden werden, sind nur die Absperrhähne für die nicht benötigten Bremsschläuche zu schließen.

Diese Tätigkeiten (Langmachen und Entkuppeln) des Verschubs (Rangierens) werden zurzeit noch vollständig manuell unter hoher körperlicher Anstrengung und bei allen Wetterlagen durchgeführt. Dies schränkt den Betrieb des Verschiebebahnhofes wesentlich ein, da zum Beispiel die Gehgeschwindigkeit durch die Vorschriften des Arbeitnehmerschutzes auf maximal $1,6 \frac{m}{s}$ begrenzt ist. Bedingt durch Regen, Schnee, aber auch Unachtsamkeit und menschliches Versagen kommt es im Bereich des Verschubs immer wieder zu Unfällen und gefährlichen Zwischenfällen. Tabelle 1.2 bietet einen Überblick über Unfälle im Rangierbetrieb am Beispiel Schweiz.

Art	Unfälle				Schwerverletzte			
	2011	2012	2013	2014	2011	2012	2013	2014
Zusammenstöße beim Rangierdienst	4	8	6	9	2	3	1	0
Entgleisungen im Rangierdienst	11	5	6	4	0	1	0	0

Tabelle 1.2: Statistik Unfallgeschehen beim Rangieren, Schweiz [vgl. 22, S.21]

Dies sind wesentliche Argumente für eine Modernisierung des Verschubs mit einer Automatisierung des Langmachens und Entkuppelns. Der wirtschaftliche Faktor dieser Modernisierung durch mehr abgefertigte Güterwagen pro Stunde, durch Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit et cetera liefert einen zusätzlichen Anreiz.

1.3 FORSCHUNGSFRAGEN

Im Zuge dieser Arbeit sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Ist ein vollautomatisches Trennen der Schraubenkupplung mit den derzeit zur Verfügung stehenden technischen Mitteln möglich?
 - Welche Abläufe sind dabei zu erfüllen?
- Welche geometrischen, kinematischen, mechanischen und arbeitsrechtlichen Randbedingungen sind einzuhalten?

- Wie muss eine Trennvorrichtung aufgebaut sein, damit sie alle Aufgaben und Abläufe erfolgreich erfüllen kann und das in möglichst kurzer Zeit?
- Ist die Wirtschaftlichkeit potentieller Konzepte gegeben?
- Welche Informationen (Messgrößen) sind erforderlich, um den Trennprozess zu automatisieren?
- Welche Sensoren können die gegebenen Randbedingungen und gestellten Anforderungen erfüllen?
- Durch welche Datenverarbeitungsalgorithmen können die notwendigen Informationen gewonnen werden?

1.4 METHODIK

Im Rahmen des von FFG und BMVIT „Mobilität der Zukunft“ geförderten Projektes EntKuRo (Entkupplungsroboter) erfolgte die Entwicklung automatisierter Lösungen für Langmachen und Entkuppeln. Die Tätigkeiten im Rahmen des Dissertationsprojektes können in folgende Arbeitspakete gegliedert werden:

- Projektmanagement
- Produktentwicklung
- Konstruktion
- Entwicklung einer Sensoriklösung
- Datenverarbeitung und Auswertung
- Regelungs-, Steuerungs- und Antriebstechnik
- Mechanische Simulation
- Versuchsdurchführung und Auswertung

Folgende Punkte dienen zur Beantwortung der Forschungsfragen:

- Sichtung aller bisherigen relevanten Veröffentlichungen von Konzepten und Patenten aus dem Bereich automatisiertes Manipulieren von Schraubenkupplungen. Analyse der bestehenden Konzepte, insbesondere deren Umsetzungsschwierigkeiten, Realisierungsprobleme und Schwächen.

- Analyse und Ausarbeitung der geometrischen, kinematischen, mechanischen und arbeitsrechtlichen Randbedingungen sowie notwendigen Voraussetzungen und Messgrößen, unter Berücksichtigung der aktuell angewendeten Abläufe zur Trennung von Schraubenkupplungen.
- Schaffung von eigenständigen neuartigen Konzepten (mechanisch, sensorisch,...) zur automatisierten Trennung der Schraubenkupplung.
- Bewertung der entwickelten Konzepte hinsichtlich einer wirtschaftlichen Realisierung und einer Umsetzbarkeit nach dem aktuellen Stand der Technik.
- Entwicklung eines sensorischen Systems mit entsprechenden Softwarekomponenten welches in der Lage ist die geforderten Messgrößen zu ermitteln, geeignet aufzubereiten, zur Verfügung zu stellen und die Mechanik zu steuern oder zu regeln.
- Entwicklung und Beschaffung von Hardware- und Softwarekomponenten welche fähig sind die Schraubenkupplung, deren Position und den Zustand (ob die Schraubenkupplung korrekt langgemacht ist) zu detektieren.
- Schaffung einer funktionierenden Versuchsanlage im Labor, um Schraubenkupplungen automatisch langzumachen.
- Aufbau einer funktionierenden Testanlage am Verschiebebahnhof Linz, um Trennstellen automatisch zu entkuppeln.

2 BESTEHENDE LÖSUNGSANSÄTZE ZUM AUTOMATISCHEN TRENNEN VON GÜTERWAGEN

2.1 ÜBERBLICK ÜBER EXISTIERENDE LÖSUNGSANSÄTZE

„Basierend auf einer Patentrecherche ergibt sich, dass es zwar zahlreiche Patente gibt, die sich mit automatischen Kupplungen und Automatisierung im Rangierbahnhof befassen, allerdings beziehen sich diese zumeist auf die automatische Mittelpufferkupplung. Unter anderem wurden bereits in den 1980er Jahren Patente für das automatische „Aushängen“ langgemachter Schraubenkupplungen angemeldet.“ [23, S.362] Durch die damaligen Bemühungen in Deutschland, die Z-AK einzuführen, wurden die Ziele einzelner Forschungsprojekte darauf ausgerichtet [vgl. 24, S.250] und die automatisierte Handhabung der Schraubenkupplung augenscheinlich nicht weiterverfolgt. Eine praktische Verwertung der Patente ist nicht bekannt. Zahlreiche Artikel in diversen Fachzeitschriften beschäftigen sich mit der automatischen Handhabung der Schraubenkupplung und mit der Einführung einer automatischen Kupplung (siehe [2, 3, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]).

Existierende Patente:

- **DE 3819388 A1**, *Einrichtung und Verfahren zum automatischen Trennen von Güterwagen mit Schraubenkupplungen*
- **DE 19621651 C2**, *Vorrichtung zum Abkuppeln von Schienenfahrzeugen*
- **DE 102008034018 B3**, *Verfahren zum Ermitteln des Kupplungszustands einer Eisenbahnkupplung, Eisenbahnkupplung [!] sowie Anordnung mit einer Eisenbahnkupplung*
- **DE 2249421 A1**, *Vorrichtung zum Entkuppeln von Schienenfahrzeugen mit automatischen Kupplungen*
- **DE 3344979 C2 / EP 0144619 A2**, *Rangieranlage für Schienenfahrzeuge*

- **DE 4015878 A1**, *Einrichtung zum vollautomatischen Trennen von Güterwagen mit automatischen Kupplungen*
- **DE 4302377 C2**, *Einrichtung zum Automatisieren des Rangierbetriebes von Schienenfahrzeugen*
- **DE 19545396 A1**, *Automatische Schraubenkupplung*

Veröffentlichungen (Auszug):

- **„Automatisierung von Ablaufanlagen mit dem Kupplungsroboter“**, (H. Rake, W. Schwanhäüßer, F. Frederich, M. Enning), ETR 1993 04
- **„Die Integration von Entkuppungsrobotern in den Ablaufbetrieb“**, (W. Schwanhäüßer, A. Müller), ETR 1995 10
- **„Die Automatische Mittelpufferkupplung (AK)“**, (B. Sünderhauf), ALTA-PLAN LEASING GmbH 2009 04
- **„Untersuchung von Einsatzszenarien einer automatischen Mittelpufferkupplung“**, (H. Stuhr), ETR 2013 06, Dissertation TU Berlin
- **„Das COS-BOT-System, ein theoretisches Konzept zur Automatisierung in Eisenbahn-Terminals“**, (A. Carrillo Zanuy, J. Juan Gimeno), ETR 2015 01
- **„Ein Roboter im Berner Raum“**, (E. Jänsch), ETR 2015 01
- **„Mehr Güter auf die Schiene! Aber wie?“**, (U. Höft), Gutachten für die Fraktion Bündnis 90/Die Grünen im Deutschen Bundestag 2016 05
- **„Das Ziel klar im Blick“**, (K. Zapp), Rail Business Spezial 2018 1
- **„Zukunftsfähige Güterwagen: Revolution statt Evolution“**, (R. Jahncke, R. Bänsch, J. Kohlschütter), Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2019 01

Die aufgelisteten Patente und Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem automatischen Trennen von Güterwagen. Es werden verschiedene Möglichkeiten und Ansätze aufgezeigt, um die nicht trivialen Probleme des Langmachens und Entkuppelns zu lösen. Keiner der Ansätze und Patente schaffte es, zu einem Endprodukt entwickelt und im breiten Feld eingesetzt zu werden. Dies beruht mutmaßlich zum Teil auf den immensen dafür notwendigen Umrüstungskosten sowie auf der zur jeweiligen Zeit noch nicht vorhandenen, beziehungsweise unausgereiften Sensorik, um alle Aufgabenbereiche zu bewältigen. Im Folgenden wird eine Auswahl an Patenten aufgezeigt und mögliche Einsatzschwierigkeiten erörtert.

2.2 ANALYSE AUSGEWÄHLTER PATENTE

2.2.1 DE 3344979 C2 / EP 0144619 A2 (RANGIERANLAGE FÜR SCHIENENFAHRZEUGE, 1983)

„Rangieranlage für Schienenfahrzeuge mit automatischer Wagenentkupplung, mit einer verzweigten Gleisanlage, mit direkt unterhalb der Obergleise vorgesehenen Untergleisen, die von Schienenschleppwagen ohne Behinderung von auf dem Obergleis rollenden Waggons befahrbar sind [...]“ [31, S.3]. Erörtert wird im Folgenden das Konzept zur automatischen Trennung. Dazu werden sogenannte Förderkatzen (Abbildung 2.2) eingesetzt, die mit Werkzeugen (Druckluftkupplungsgreifer (1), Zugkupplungsbügelgreifer (2), Spannschraubendreher (3)) zum Kuppeln und Entkuppeln ausgestattet sind. Die Förderkatzen befinden sich wiederum unterhalb des Gleises im Gleisbett und manipulieren die Schraubenkupplung von unten, dargestellt in Abbildung 2.1.

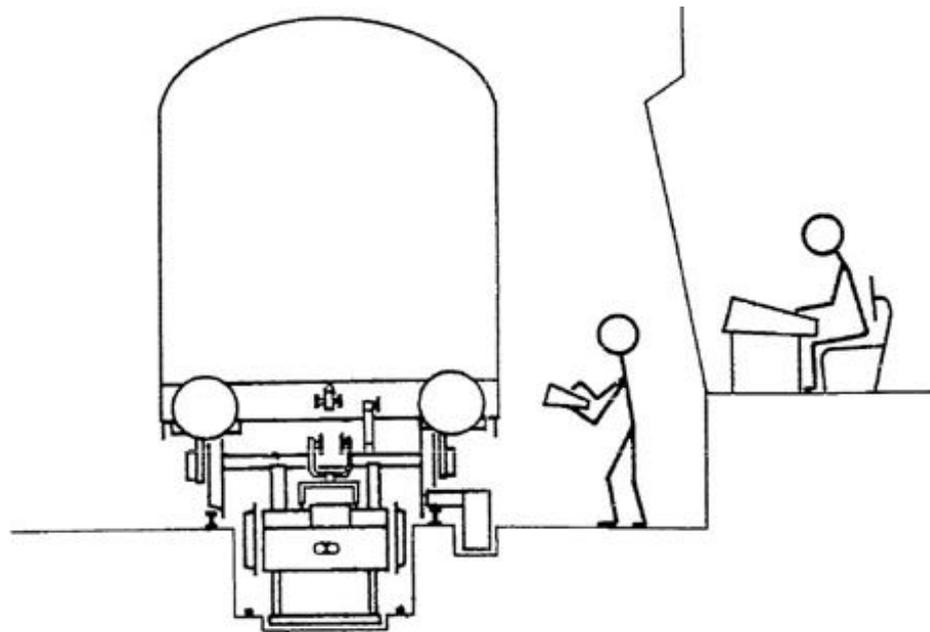


Abbildung 2.1: Patentskizze: DE 3344979 C2 [vgl. 31, S.11]

Durch die eingesetzte Sensorik wird die Förderkatze genau zur Schraubenkupplung positioniert. Nun können die jeweiligen Werkzeuge (erkennbar in Abbildung 2.2) eingesetzt werden. Für das Langmachen wird im Wesentlichen ein halbiertes Ring neben der Schraubenkupplung aufgerichtet und die Ringhälften miteinander verbunden, um den Kupplungsschwengel zu greifen und die Schraubenkupplung aufzuschrauben. Ein weiteres Werkzeug, der Zugkupplungsbügelgreifer ist so gebaut, dass damit der Kupplungsbügel aus dem Zughaken gehoben werden kann. [vgl. 31, S.7ff]

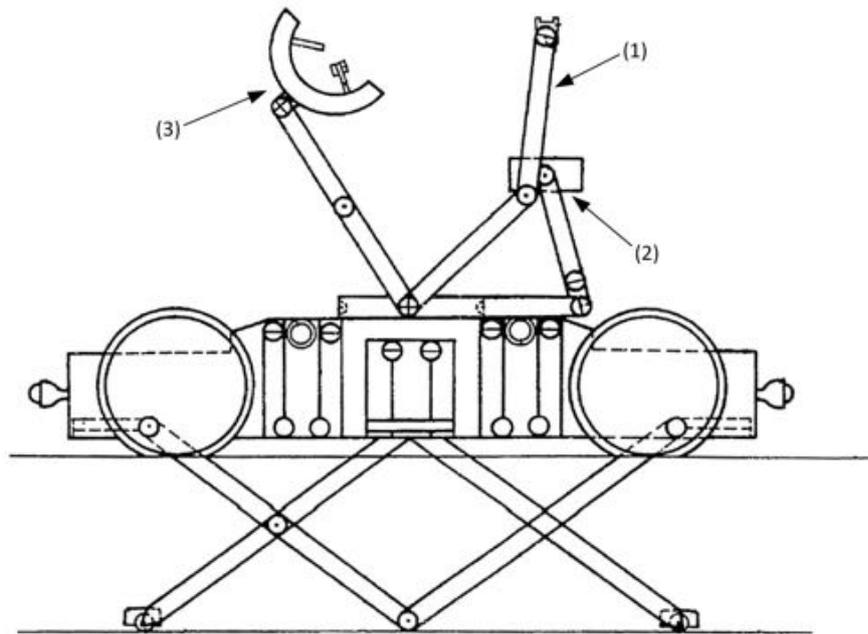


Abbildung 2.2: Patentskizze: DE 3344979 C2, Seitenansicht einer Förderkatze [vgl. 31, S.11]

(1)...Druckluftkupplungsgreifer (2)...Zugkupplungsbügelgreifer (3)...Spannschraubendreher

Dieses Patent befasst sich in weiterer Folge nicht nur mit dem Kuppeln und Entkuppeln, sondern generell mit dem gesamten Aufbau eines Verschiebebahnhofs. So ist zum Beispiel der Aufbau mehrstöckiger Gleisanlagen angedacht, siehe Abbildung 2.3.

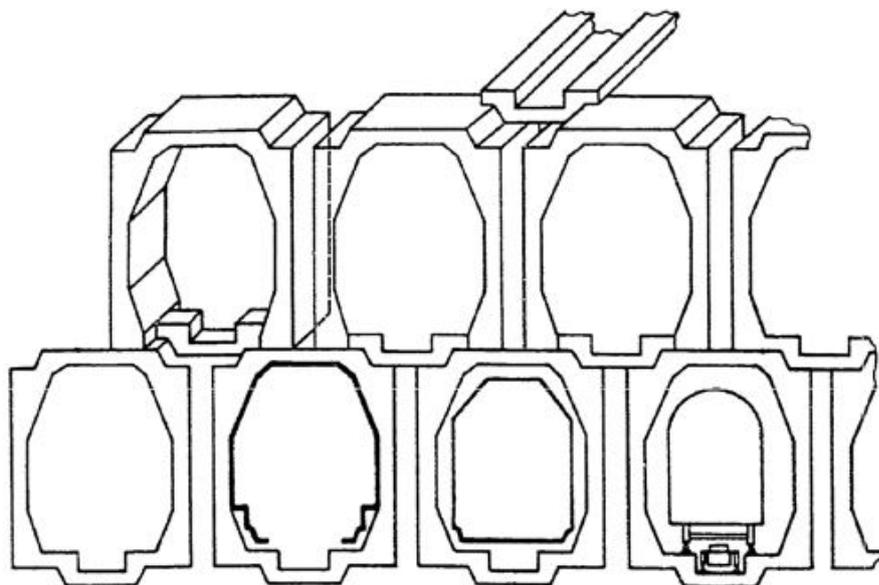


Abbildung 2.3: Patentskizze: DE 3344979 C2, Gleisanlage [vgl. 31, S.10]

Erkenntnisse

1) Mechanik

- Verfahrenmöglichkeit oberhalb sowie unterhalb des Gleises
 - Automatischer Wechsel zwischen den Gleisen (Obergleis, Untergleis)
 - Zugriff zur Schraubenkupplung erfolgt von unten
 - Anheben der Förderkatze durch einen Scherenhubtisch
- Das Aufschrauben der Schraubenkupplung wird durch Ringhälften umgesetzt
 - Die Ringhälften werden um die Schraubenkupplung herum verbunden und in Rotation versetzt
 - Sie bestehen aus zwei konzentrischen Ringscheiben die unabhängig voneinander in beide Richtungen gedreht werden können
 - Durch gegenläufiges Drehen der Ringscheiben kann der Kupplungsschwengel von beiden Seiten erfasst und dann gleichläufig auf- oder zugeschraubt werden
- Durch eine gezielte Bewegung des Zugbügelgreifers wird die Schraubenkupplung aus dem Zughaken gehoben
- Ein u-förmiger Greifer bewerkstelligt die Betätigung der Absperrhähne für die Druckluft
- Um die Bremsschläuche zu öffnen, werden diese gegeneinander verdreht
- Ziehen der Güterwagen durch die Förderkatzen → Zugkupplungsbügelgreifer

2) Sensorik

- Anbringung einer Nummernscheibe je Güterwagen zur Identifikation notwendig (muss nach dem Entkupplungsvorgang wieder entfernt werden)
- Abstandssensoren zur kontrollierten Anfahrt an stehende Güterwagen
- Sensoren zur Bestimmung der Lage der Kupplungsteile (Anmerkung: Details unbekannt)
- Tast- oder Induktionssensoren zur Feineinstellung der Manipulationsarme

3) Einbau und Rahmenbedingungen

- Elektromotoren mit Stromschiene zur Energieversorgung und Datenübertragung
- Anlegen einer Grube innerhalb der Gleise, als Fahrweg der Förderkatzen
 - Absicherung der Grube notwendig (Arbeitnehmerschutz)

- Entwässerung sowie Reinigung durch vermehrte Schmutzansammlung erforderlich
- Alternative Befestigung der Schiene notwendig, anstatt der Schwellen
- Erschwerter Wartungszugang
- Mehrstöckiger Aufbau der Gleisanlagen
- In der Regel maximal 200 Förderkatzen je Verschiebebahnhof [vgl. 31, S.9]
- Inspektion und Identifikation der Güterwagen von einer Person, am Beginn des Prozesses
- Zweite Bedienungsperson kontrolliert die Wagenverbindung am Ende des Prozesses
- Typische Geschwindigkeit innerhalb der Entkuppelstation $0,5 - 1 \frac{m}{s}$

4) Fazit

Die im Patent dargestellten Werkzeuge (Druckluftkupplungsgreifer, Zugkupplungsbügelgreifer, Spannschraubendreher) scheinen aus mechanischer Sicht durchwegs plausibel zu funktionieren. Der Aufbau und Ablauf wirkt allerdings sehr komplex. Es ist sowohl ein Kuppeln als auch ein Trennen möglich.

Durch die vorgesehenen massiven Änderungen bestehender Verschiebebahnhöfe durch die mehrstöckige Gleisanlage sowie der erforderlichen Gruben entsteht ein massiver baulicher Aufwand, der mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Ebenso entsteht durch den Einsatz von bis zu 200 Förderkatzen ein erheblicher Kostenaufwand. Eine wirtschaftliche Realisierung des Patents erscheint deshalb äußerst unrealistisch. [vgl. 23, S.364f]

Die exakte Positionierung der einzelnen Werkzeuge wirkt sehr komplex und schwierig. Dementsprechend sind die Anforderungen an die dafür notwendigen Sensorsysteme hoch, die zum Teil zur Zeit der Patentierung noch nicht vorhanden oder zu wenig ausgereift waren. Ebenso gestaltet sich die Energieversorgung der Förderkatzen durch die geplanten Gleiswechsel zwischen Ober- und Untergleis problematisch.

2.2.2 DE 3819388 A1 (EINRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM AUTOMATISCHEN TRENNEN VON GÜTERWAGEN MIT SCHRAUBENKUPPLUNGEN, 1988)

Dieses Patent „[...] betrifft eine Einrichtung und zugehörige Steuerungsverfahren zum automatischen Trennen von Güterwagen mit Schraubenkupplungen“ [32, S.2], dessen Mechanismus innerhalb des Gleises (siehe dazu Abbildung 2.4) eingebaut werden soll. Die Einrichtung (Kupplungsauswerfer) besitzt eine Verfahrmöglichkeit in X-Richtung sowie einen Hebemechanismus in Z-Richtung. Mittels geeigneter Sensorik erfolgt die Detektion des Zuganfangs, die Einrichtung beschleunigt und in weiterer Folge findet zuerst eine grobe und dann eine feine Positionierung zur Kupplungsmitte statt. Anschließend wirft die Stoßeinrichtung mit Effektor die Schraubenkupplung aus. „Die Automation dieses Vorganges erfordert neben einer geeigneten Einrichtung eine Steuerung und Koordinierung des Bewegungsablaufes des Auswurfvorganges, zum einen, um diesen sicher, zuverlässig und kontrolliert ausführen zu können, zum anderen, um auch bei Behinderungen oder Kollisionen während des Auswurfvorganges einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.“ [32, S.2]

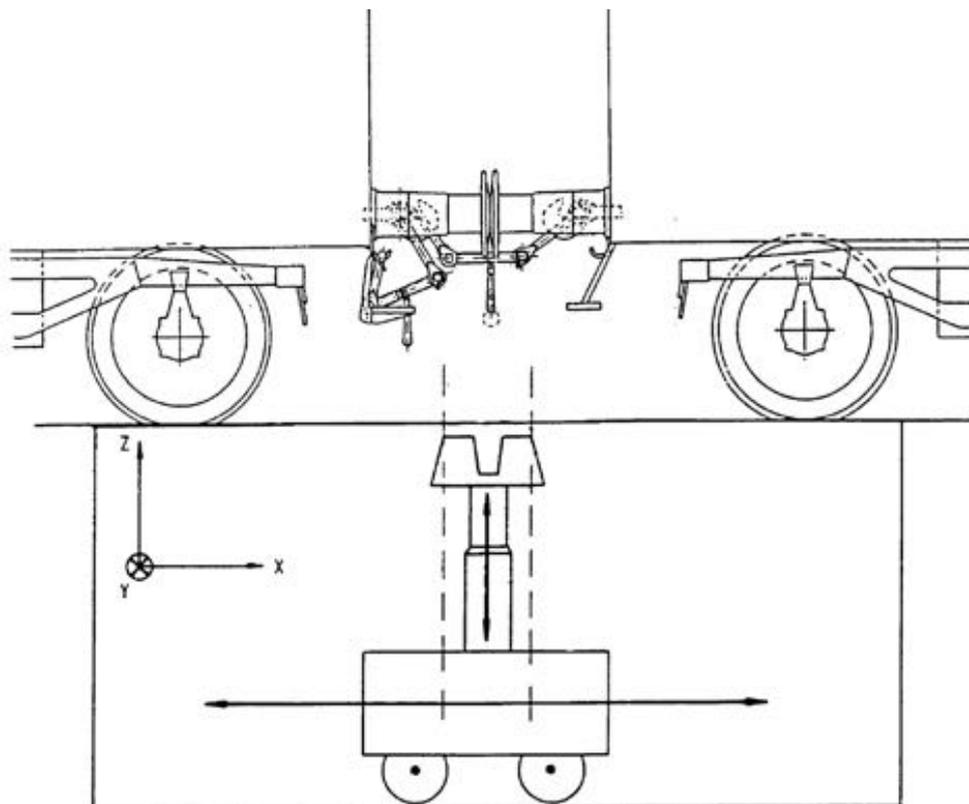


Abbildung 2.4: Patentskizze: DE 3819388 A1 [vgl. 32, S.10]

Als Effektor sind verschiedene Konzepte angedacht. Der Effektor ermöglicht letztendlich durch seine geometrische Form das Aushängen der Schraubenkupplung. Eine Möglichkeit ist ein drehbar gelagertes U-Profil, dargestellt in Abbildung 2.4 und 2.5 (a). Weiters wird eine an zwei Kanten abgerundete Platte mit fester oder verstellbarer Neigung (Abbildung 2.5 (b)) aufgezeigt, die die Schraubenkupplung aus dem Zughaken hebt und an der schließlich die Schraubenkupplung abgleiten kann. [vgl. 32]

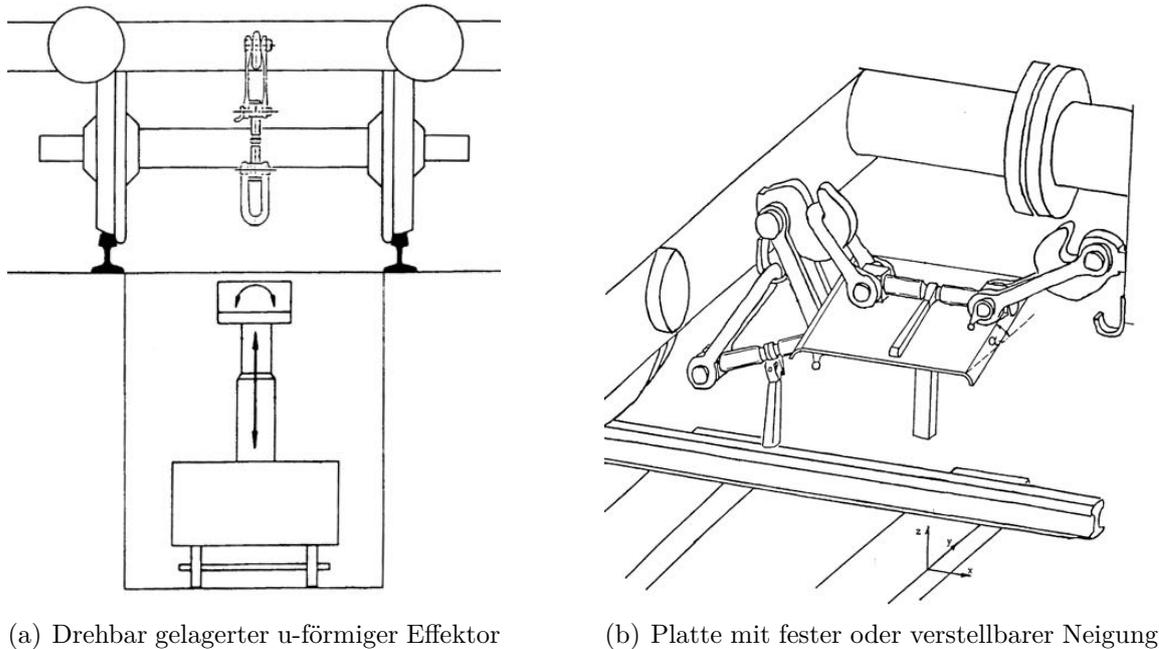


Abbildung 2.5: Patentskizze: DE 3819388 A1, Varianten Effektor [vgl. 32, S.11, S.14]

Erkenntnisse

1) Mechanik

- Antriebseinrichtung für Beschleunigung und Positionierung unterhalb der Schraubenkupplung (X-Richtung)
 - Verfahrmöglichkeit unterhalb des Gleises
 - Antriebsart nicht definiert, nach Abbildung 2.4: Räder
- Hebemechanismus für die vertikale Bewegung (Z-Richtung)
 - Zugriff erfolgt von unten
 - Bewegung durch Teleskopzylinder
- Effektor für die Führung der Schraubenkupplung während des Entkuppelns
- Keine Betätigung der Absperrhähne möglich

- Kein Öffnen der Bremsschläuche möglich
- Kein Kuppeln der Schraubenkupplung möglich

2) Sensorik

- Zuganfangs- und Zugendeerkennung
- Geschwindigkeitsmessung und Integration der Geschwindigkeit
- Erkennung der Kupplungsstellen durch Erkennung des Überganges Hülse-Puffer-Hülse mittels Durchmessermessung
- Abstandssensoren zur Positionierung des Effektors

3) Einbau und Rahmenbedingungen

- Einbau des Kupplungsauswerfers unterhalb des Gleises in einer Grube
 - Absicherung der Grube notwendig (Arbeitnehmerschutz)
 - Entwässerung sowie Reinigung durch vermehrte Schmutzansammlung erforderlich
 - Alternative Befestigung der Schiene notwendig, anstatt der Schwellen
 - Erschwerter Wartungszugang
- Automatischer Betrieb ohne Bedienungspersonal
- Übertragung aller relevanten Daten (Zerlegeliste,...) an den Kupplungsauswerfer
- Keine Angabe zur Energieversorgung
- Fahrgeschwindigkeiten unbekannt

4) Fazit

Die dargelegte Funktionsweise des im Patent vorgestellten Konzeptes erscheint aus mechanischer und funktionaler Sicht plausibel. Das Konzept zeichnet sich durch einen einfachen und robusten Aufbau der mechanischen Komponenten aus. Es ist ausschließlich ein Entkuppeln langgemachter Schraubenkupplungen möglich.

Gegen eine mögliche Realisierung der Erfindung sprechen mehrere Dinge. Als wohl naheliegendstes und aus wirtschaftlicher Sicht wohl stärkstes Hemmnis dürfte der erforderliche Umbau des Gleisbettes mit Schaffung einer passenden Grube für die Einrichtung sein. Zusätzlich ergeben sich weitere Aspekte in Richtung Arbeitnehmerschutz, die eine entsprechende Sicherung der Grube erforderlich machen dürften. Notwendige Sensoren sowie leistungsstarke Rechner zur Bestimmung der nötigen Parameter waren zur Zeit der Patentierung nur teilweise vorhanden. [vgl. 23, S.364f]

2.2.3 DE 4015878 A1 (EINRICHTUNG ZUM VOLLAUTOMATISCHEN TRENNEN VON GÜTERWAGEN MIT AUTOMATISCHEN KUPPLUNGEN, 1990)

Betrifft „[...] eine Einrichtung zum vollautomatischen Trennen von Güterwagen mit automatischen Kupplungen“ [33, S.2]. Die Erfindung betrachtet das Szenario, dass bereits automatische Kupplungen eingesetzt werden, bei denen allerdings noch immer in Handarbeit die Betätigungseinrichtung des Riegel-Systems gedreht werden muss. Der Mechanismus soll den Automatisierungsgrad noch weiter erhöhen und die automatische Kupplung mit Hilfe eines Roboterarmes (Abbildung 2.6) am fahrenden Zug entriegeln.

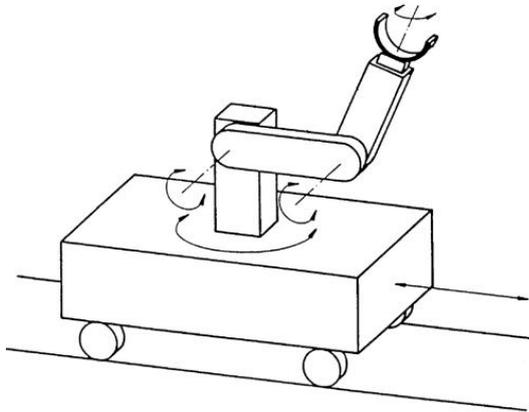
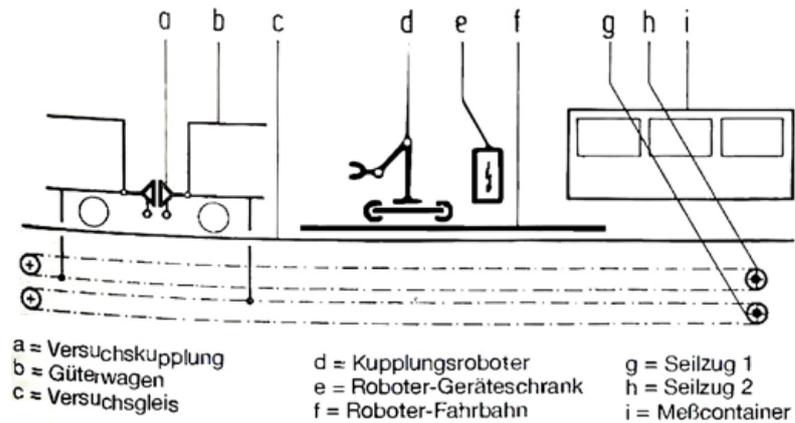
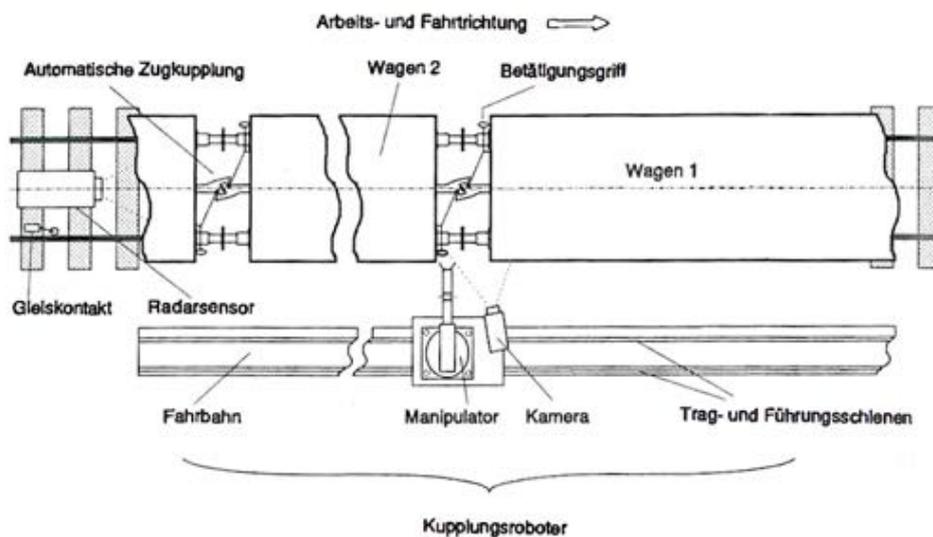


Abbildung 2.6: Patentskizze: DE 4015878 A1 [vgl. 33, S.8]

Von Seiten der RWTH Aachen wurde das Konzept des Patentes zu einem Prototyp zur Entkupplung der Z-AK weiterentwickelt. Im Folgenden wird nur mehr der Prototyp behandelt. Der Aufbau der Versuchsanordnung des Prototyps ist in Abbildung 2.7 ersichtlich. Die Betätigung des Riegel-Systems soll am fahrenden Zug, von einem Roboterarm mit Greifer, durchgeführt werden. Dazu befinden sich seitlich neben dem Gleis angeordnet Trag- und Führungsschienen an denen der Kupplungsroboter in Längsrichtung parallel zum Zug verfahren kann. Die Güterwagen können durch zwei eigenständige Seiltriebe „unabhängig“ voneinander bewegt werden. Dadurch ist es möglich eine Vielzahl verschiedener Situationen reproduzierbar zu testen. Durch den Einsatz eines Kamerasystems erfolgt zusätzlich zur bestehenden Positionsbestimmung eine genaue Lokalisierung des Betätigungsgriffes des Riegel-Systems, die für die Positionierung des Greifers zwingend notwendig ist. [vgl. 24]



(a) Versuchsanordnung, Seitenansicht



(b) Versuchsanordnung, Sicht von Oben

Abbildung 2.7: Versuchsaufbau [24, S.250ff] auf Basis von [32]

Erkenntnisse

1) Mechanik

- Entkuppeln automatischer Mittelpufferkupplungen, wie zum Beispiel UIC522, beziehungsweise Z-AK [24]
- Antriebseinrichtung für Beschleunigung und Positionierung neben dem Gleis (X-Richtung)
 - Linearachse mit 4-Quadranten-Umrichtersteuerung
- Manipulator (Roboterarm)
 - Zugriff erfolgt von der Seite

- Keine Betätigung der Absperrhähne notwendig
- Kein Öffnen der Bremsschläuche notwendig

2) Sensorik

- Zuganfangs- und Zugendeerkennung (zum Beispiel durch Erkennung der ersten Pufferstoßebene)
- Geschwindigkeitsmessung und Integration der Geschwindigkeit
 - Abgleich der errechneten Position mit den Daten der Zerlegeliste,...
- Erkennung der Kupplungsstellen durch Erkennung des Überganges Hülse-Puffer-Hülse mittels Durchmessermessung (Korrektur der Integrationsergebnisse)
- Kamerasystem zur exakten Bestimmung des Betätigungsgriffes

3) Einbau und Rahmenbedingungen

- Einbau des Kupplungsauswerfers seitlich neben dem Gleis
 - Es muss ausreichend Platz auf der entsprechenden Seite neben dem Gleis zur Verfügung stehen
 - Der Bereich kann vom Verschubpersonal in weiterer Folge nicht mehr genutzt werden
- Automatischer Betrieb ohne Bedienungspersonal
- Übertragung aller relevanten Daten (Zerlegeliste,...) an den Kupplungsroboter
- Elektrische Energieversorgung
- Fahrgeschwindigkeiten unbekannt

4) Fazit

Die Funktionsweise des Konzeptes wirkt plausibel und technisch realisierbar. Durch den Einsatz eines Roboterarmes kommt es allerdings zu einer erhöhten Komplexität sowie hohen Kosten.

Die Umsetzung des Patentes ist letztlich an der bis dato fehlenden Grundlage, der im Güterverkehr nicht eingesetzten automatischen Kupplung, gescheitert. Der notwendige Einbau einer eigenen Verfahrmöglichkeit (zum Beispiel: Schiene) und der für den Mechanismus benötigte Arbeitsraum stellen weitere Hindernisse dar. Die erforderliche hohe Genauigkeit, mit der der Betätigungsgriff erreicht werden muss, erschwert die Aufgabe noch weiter.

2.2.4 DE 19621651 C2 (VORRICHTUNG ZUM ABKUPPELN VON SCHIENENFAHRZEUGEN, 1996)

„Die Erfindung bezieht sich auf eine vorzugsweise automatisch arbeitende Vorrichtung zum Abkuppeln von Schienenfahrzeugen bzw. Eisenbahnwaggonen und eignet sich insbesondere zur Verwendung in Verbindung mit einem Schienenfahrzeug-Positionierer. [... Es handelt sich dabei um eine] Vorrichtung zum Abkuppeln von Schienenfahrzeugen mit einander gegenüberliegenden Kupplungshälften, mit Verriegelungszapfen, mit einem angesteuerten Roboter zum Betätigen eines Zapfengreifers und einem Ortungssystem [...]“ [34, S.2]. Das Patent geht somit von derselben Gegebenheit aus, wie das zuvor erwähnte Patent DE 4015878 A1, dass bereits eine teilautomatische Kupplung eingeführt wurde und nur noch der letzte Teil zur Automatisierung des Prozesses realisiert werden muss. Nachfolgend in Abbildung 2.8 die graphische Darstellung des Patentes.

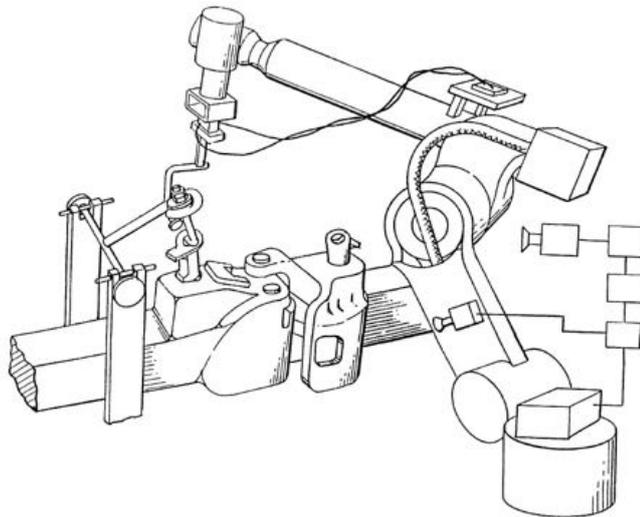


Abbildung 2.8: Patentskizze: DE 19621651 C2 [vgl. 34, S.6]

Dieses Konzept weist deutliche Ähnlichkeit zu DE 4015878 A1 auf, allerdings ist eine Steigerung der Flexibilität beabsichtigt, um verschiedenste Kupplungen auf möglichst einfache Weise zu trennen. Des Weiteren soll sich dieses Konzept an beliebigen Orten einsetzen lassen und ein Minimum von Programmierarbeit erfordern. Im Unterschied zu den bisherigen Konzepten befindet sich dieses statisch neben dem Zug ohne spezieller Verfahrenrichtung entlang des Gleises. Die Kupplungen müssen somit entsprechend positioniert werden (Waggon-Positionierer), damit der Verriegelungszapfen vom Roboter erreicht werden kann. Das Ortungssystem (zwei Kameras, Sensoreinheit, ...) registriert und identifiziert vorbeifahrende geschlossene Kupplungen und gibt dem Roboterarm die entsprechenden Positionen zum Anheben des Verriegelungszapfens vor. [vgl. 34]

Erkenntnisse

Aufgrund der starken Ähnlichkeit entsprechen die gewonnenen Erkenntnisse im Wesentlichen den unter DE 4015878 A1 gelisteten. Ebenso wie das Patent DE 4015878 A1 scheiterte eine praktische Verwendung grundsätzlich an der bis heute nicht eingeführten teilautomatischen Kupplung sowie an den bereits zuvor erwähnten weiteren Einsatzschwierigkeiten.

2.2.5 SONDIERUNGSSTUDIE (EP 3095665 B1, EP 3095666 B1)

Die Grundlegenden Fragen der Machbarkeit einer automatischen Trennung wurden bereits in einer Sondierungsstudie (2015) durchgeführt. Diese Studie dient als Basis des Forschungsprojektes auf dem diese Arbeit basiert. Als Ergebnis der Sondierung liegen erste Lösungskonzepte für das Langmachen und Entkuppeln als Patente vor:

EP 3095665 B1 (Vorrichtung zum Langmachen einer Schraubenkupplung, 2015)

„Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Langmachen einer, einen Kupplungsschwengel aufweisenden Schraubenkupplung zwischen zwei Eisenbahnfahrzeugen, mit einem Gestell, mit zumindest einem Mitnehmer für den Kupplungsschwengel, mit einer zwischen Gestell und Mitnehmer vorgesehenen Mitnehmerführung, die eine zum Umlaufen der Schraubenkupplung ausgebildete Führungsbahn aufweist, und mit einem Antrieb, welcher mit der Mitnehmerführung verbunden ist, um den Mitnehmer entlang der Führungsbahn der Mitnehmerführung zu bewegen.“ [35, S.2]

Durch die Realisierung der Mitnehmerführung als offenen Zahnkranz (Abbildung 2.9), ist es möglich, die Vorrichtung ohne Schwierigkeiten über die Schraubenkupplung zu stützen. Dieser Vorgang ist vergleichsweise sehr einfach und effizient, im Gegensatz zu bereits existierenden Lösungen, bei denen zum Beispiel zwei Ringhälften um die Schraubenkupplung zusammengefügt werden müssen (siehe Kapitel 2.2.1). Ist der Zahnkranz über die Schraubenkupplung gestützt, so kann er in Drehbewegung versetzt und durch den Mitnehmer den Kupplungsschwengel erfassen und so die Schraubenkupplung aufschrauben. [vgl. 35]

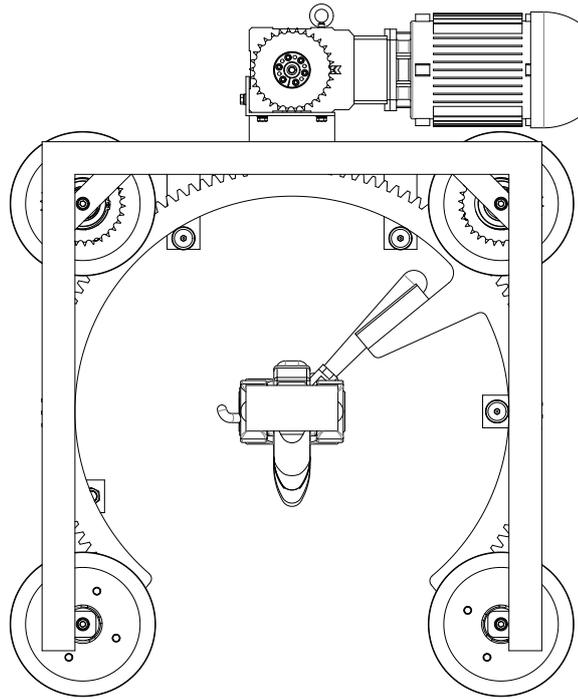


Abbildung 2.9: Patentskizze: EP 3095665 B1 [vgl. 35, S.6]

EP 3095666 B1 (Vorrichtung zum Entkuppeln einer langgemachten Schraubenkupplung, 2015)

„Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Entkuppeln einer langgemachten Schraubenkupplung zwischen Eisenbahnfahrzeugen, mit einer Einrichtung zum Bewegen dieser Vorrichtung in einer Bewegungsrichtung zwischen und entlang von Eisenbahnschienen eines Bahngleises, mit einem Manipulator, der eine Hubeinrichtung und einen an der Hubeinrichtung um eine Drehachse angelenkten Endeffektor aufweist, der über die Hubeinrichtung zwischen einer Ruhelage und einer gegenüber der Ruhelage höherliegenden Arbeitslage zum Entkuppeln der langgemachten Schraubenkupplung höhenverstellbar ist.“
[36, S.2]

Die Vorrichtung ist nach dem Wirkprinzip eines Kniehebels, ersichtlich in Abbildung 2.10, konzipiert. Durch diese Ausführung ist es möglich unterhalb des Zuges zu verfahren, um dann an der Position der Schraubenkupplung hochzuklappen und die Schraubenkupplung aus dem Zughaken zu heben.

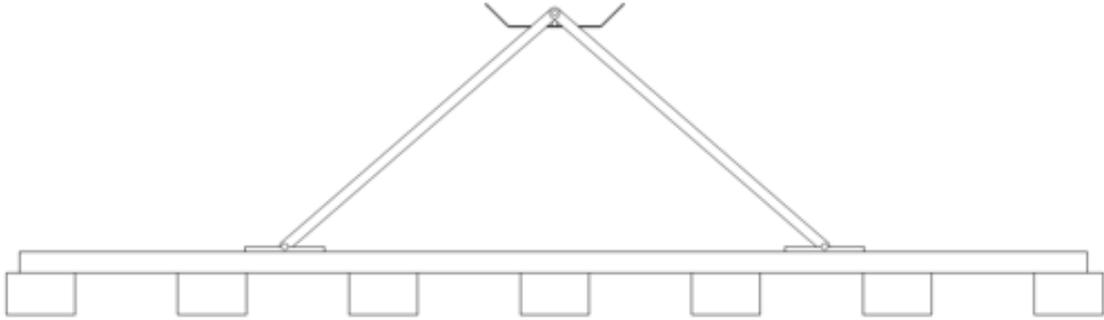


Abbildung 2.10: Patentskizze: EP 3095666 B1 [vgl. 36, S.9]

Erkenntnisse

Im Folgenden werden beide Patente der Sondierungsstudie behandelt.

1) Mechanik

- Langmachen
 - Aufschrauben durch einen offenen Zahnkranz
 - Positionierung des Kupplungsschwengels
 - Zugriff von oben
- Entkuppeln
 - Linearachse für die Positionierung
 - Zugriff von unten
 - Anheben erfolgt durch Kniehebel
- Keine Betätigung der Absperrhähne
- Kein Öffnen der Bremsschläuche
- Kein Kuppeln möglich

2) Sensorik

- Entkuppeln: Sensoren zur Positionsbestimmung der Schraubenkupplung (Time-of-Flight Kamera (ToF-Kamera) und Lichtschnittdetektor)
- Langmachen: nicht festgelegt

3) Einbau und Rahmenbedingungen

- Langmachen
 - Art des Einbaus und der Positionierung nicht festgelegt

- Entkuppeln
 - Einbau innerhalb des Gleises auf den Schwellen
 - Nachträglicher Einbau ohne besondere Maßnahmen möglich
- Energieversorgung nicht festgelegt
- Fahrgeschwindigkeiten nicht festgelegt

4) Fazit

Beide Patente zeigen aus mechanischer Sicht einfache und robuste Lösungen auf, die nach ersten Erkenntnissen ohne besonders hohen Aufwand in bestehende Anlagen integriert werden können. Teilweise fehlen in diesen Konzepten noch einzelne Tätigkeiten und Abläufe, wie Bremsschläuche öffnen, die für ein funktionierendes automatisches Gesamtkonzept noch zu entwickeln sind.

Diese Konzepte führten zu der Bewertung einer realistischen Umsetzbarkeit einer automatischen Trennung von Güterwagen. Somit spricht aus heutiger Sicht, im Sinne der technischen Möglichkeiten, nichts gegen die Realisierung eines geeigneten Mechanismus für das Langmachen und Entkuppeln von Güterwagen mit Schraubenkupplungen.

2.2.6 ZUSAMMENFASSENDE ERKENNTNISSE

Als zweites entscheidendes Merkmal, neben der zuverlässigen Funktionsweise, lässt sich die Wirtschaftlichkeit einer Trennvorrichtung festmachen. Aus unternehmerischer Sicht kommt es somit zu keiner Umsetzung wenn die entsprechende Wirtschaftlichkeit nicht gegeben ist. Aus diesem Standpunkt lässt sich die Erfordernis ableiten, dass eine realisierbare Lösung zum Einen zuverlässig funktionieren muss, zum Anderen möglichst einfach in ihrer Funktion ist und mit geringem Aufwand in bestehende Anlagen integrierbar ist.

Die Sensorik und die Auswertung der aufgezeichneten Daten ist hierbei nicht zu vernachlässigen. Zur Zeit der Entstehung der ersten Patente (1980er) waren die verfügbaren Rechner und Sensoren noch sehr leistungsschwach und teuer. Dieser Umstand wirkte sich zusätzlich negativ auf die Systemkosten aus. Der Umstand, dass mittlerweile vergleichsweise günstige Rechner mit deutlich größeren Rechenleistungen zur Verfügung stehen, ermöglicht die für den Betrieb nötige Auswertung der Sensorik sowie auch die Regelung oder Steuerung des Mechanismus.

Im Bereich der Sensorik gab es in den letzten Jahrzehnten mitunter teils große Entwicklungen. Die heutige Sensorik ist mit ihrer Vielzahl an Möglichkeiten bestens gerüstet für die Ermittlung der notwendigen Parameter, die für den Einsatz einer automatischen Entkupplung unablässig sind.

In den verschiedenen Patenten sind verschiedenste Lösungsmöglichkeiten für das automatische Trennen dargelegt. Die verschiedenen Ansätze sowie Zugriffsart und Richtung unterscheiden sich zum Teil stark und haben ihre Stärken und Schwächen. Obwohl in den Patenten DE 19621651 und DE 4015878 automatische Kupplungen vorausgesetzt werden, lässt sich der Ansatz auch auf die Schraubenkupplung anwenden. So scheint es durchaus technisch realisierbar, die Schraubenkupplung mit einem Roboterarm zu greifen.

Die Erkenntnisse und Lösungsansätze dienen im Folgenden als Grundlage für die Suche geeigneter Prinzipien und Wirkstrukturen. Als Übersicht sind in Tabelle 2.1 die Erkenntnisse und Eigenschaften der verschiedenen Patente zusammengefasst.

	DE 3344979	DE 3819388	DE 4015878	DE 19621651	EP 3095665 / 3095666
Art des Zugriffs	von unten	von unten	seitlich	seitlich	von unten / oben
Langmachen	Ringhälften	–	–	–	offener Zahnkranz
Entkuppeln	Greifer	Platte / u-Form	Roboterarm	Roboterarm	Platte
Einbauort	Grube im Gleis	Grube im Gleis	Fahrbahn neben Gleis	neben Gleis	innerhalb / neben Gleis
Komplexität	hoch	niedrig	mittel / hoch	mittel / hoch	niedrig
Kosten	hoch	hoch	mittel / hoch	mittel	niedrig
Automatisierungsgrad	hoch	niedrig	mittel / hoch	mittel / hoch	mittel
Robustheit / Toleranz	niedrig	hoch	niedrig / mittel	niedrig / mittel	hoch
Bremsschläuche öffnen	+	–	–	–	–
Absperrhähne schließen	+	–	–	–	–
Lösezug betätigen	–	–	–	–	–

Tabelle 2.1: Übersicht der analysierten Patente

3 ANALYSE DER BESTEHENDEN ABLÄUFE UND GEgebenHEITEN

Im Folgenden wird das derzeit bestehende System des Trennprozesses analysiert und beschrieben. Ebenso erfolgt eine Erfassung der räumlichen und mechanischen Gegebenheiten sowie eine Eruiierung potentieller Zugriffsmöglichkeiten, um problemlos mit einer Mechanik zur Schraubenkupplung zu gelangen. Notwendige Parameter, die mutmaßlich für einen automatischen Trennprozess unbedingt notwendig sind, gilt es zu finden. In weiterer Folge ist es nötig, geeignete Sensoren beziehungsweise Messverfahren zu finden, die die jeweiligen Parameter bestimmen können.

3.1 ANALYSE DER PROZESSE DES BESTEHENDEN SYSTEMS

Der bisherige Ablauf des Trennens von Güterwagen wird großteils wie zur Zeit der Erfindung der Schraubenkupplung durchgeführt. Die Aufgabenteilung erfolgt in Österreich hauptsächlich durch eine komplette örtliche Trennung von Langmachen und Entkuppeln. Diese Arbeit zielt im Weiteren auf die Entwicklung von zwei eigenständigen mechanischen Konzepten, einerseits für das Langmachen und andererseits für das Entkuppeln, mit entsprechenden sensorischen Komponenten ab.

Im Zuge des Langmachens geht ein Verschubmitarbeiter mit einer Zerlegeliste (in dieser sind die Güterwagen eines Zuges und die vorgesehenen Trennstellen eingetragen) entlang der stehenden Güterwagen in der Einfahrgruppe und sucht die Trennstellen anhand der Wagennummern. Dabei wird die Reihung der Güterwagen, der Wagentyp und diverse andere Parameter mit den Daten der Zerlegeliste verglichen. Im Vorbeigehen an den Güterwagen zieht ein Verschubmitarbeiter an den Lösezügen (Abbildung 3.2 und 3.3), um die Bremsen zu entlüften.

Das selbsttätige (indirekt wirkende) Bremssystem der Güterwagen (Abbildung 3.1) basiert auf Druckluft (5 bar), die über die Bremsschläuche in die jeweiligen Güterwagen geleitet und in Hilfsbehältern gespeichert wird. Sinkt der Druck an der Versorgungsleitung (eine Vollbremsung entspricht 3,5 bar) oder fällt dieser komplett auf 0 bar ab, so erfolgt automatisch eine Bremsung des Güterwagens. Durch die Entlüftung des Bremssystems entweicht die Druckluft aus den Hilfsbehältern, die Bremsen lösen sich und der Güterwagen kann frei rollen. Es gibt auch direkt wirkende Bremssysteme. Diese besitzen keinen Druckbehälter und werden direkt mit der Druckluft aus der Leitung gebremst. Sollte die Druckluftversorgung unterbrechen, so ist keine Bremsung mehr möglich.

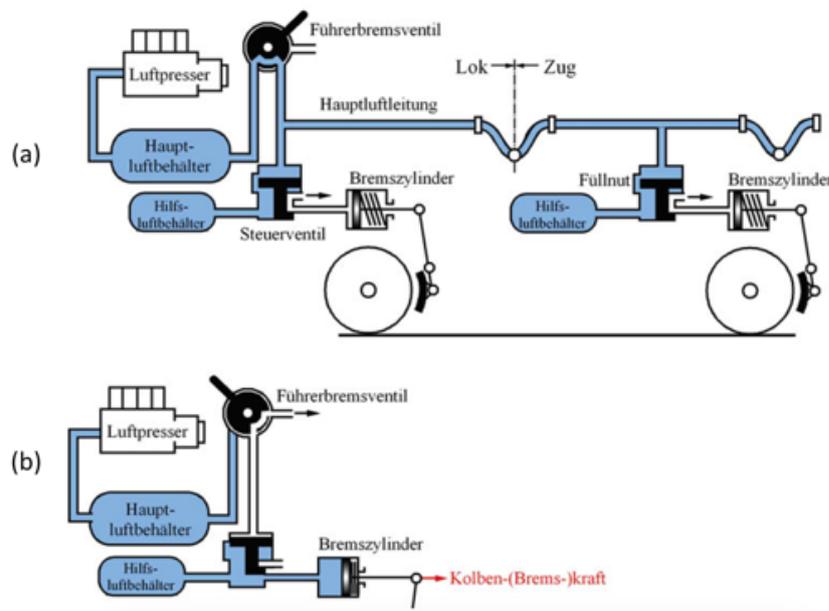


Abbildung 3.1: Indirekt wirkende Druckluftbremse (selbsttätig) [S. Plett: Einführung in die Technik der Bremsen, zit. n. 37, S.110]

(a)...Bremsse gelöst (b)...Bremsse betätigt

Auffällig ist die nicht genormte Position und Orientierung des Lösezuges sowie die veränderliche geometrische Form des Griffes (zum Beispiel Kreis, Ellipse,...). In der Regel befindet sich der Lösezug gut sichtbar im Bereich von zirka 45 cm bis 95 cm (siehe Tabelle 3.1) über der Schienenoberkante (SOK). Nicht unerheblich ist allerdings, dass vereinzelt Fälle auftreten, in denen der Lösezug zum Beispiel auf etwa 163 cm über SOK (Abbildung 3.4) positioniert ist, sich hinter einer Aufstieghilfe befindet oder verbogen ist, wodurch eine Handhabung durch eine Mechanik nahezu ausgeschlossen, beziehungsweise stark erschwert erscheint. Es ist deswegen davon auszugehen, dass sich die Betätigung des Lösezuges als nicht vollständig automatisierbar darstellt.



Abbildung 3.2: Beispiel für einen Lösezug (Markierung) [vgl. 38]



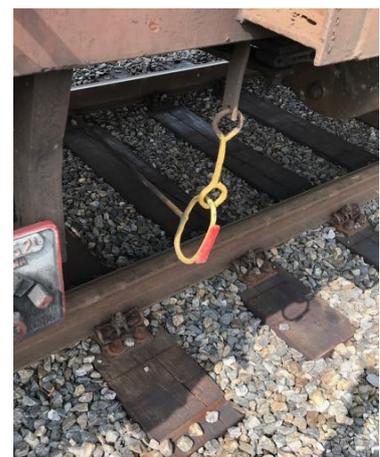
Abbildung 3.3: Weitere Anordnungen von Lösezügen



(a) Verbogener Lösezug



(b) Hohe Position des Lösezugs



(c) Gelber Lösezug

Abbildung 3.4: Sonderfälle von Lösezügen

Ist die Trennstelle identifiziert, so muss der Verschubmitarbeiter unter den Puffern hindurch in den Berner-Raum (Beschreibung folgt in Kapitel 3.2) steigen. Dieser Raum bietet für den Mitarbeiter nur einen eingeschränkten Bewegungsfreiraum, was mitunter zu ungünstigen Körperhaltungen im Rahmen seiner Tätigkeiten führt. Die erste Aufgabe des Verschubmitarbeiters im Berner-Raum besteht darin, die Bremsschläuche zu öffnen. Diese sind durch einen Bajonettverschluss miteinander verbunden und werden in der Regel durch einfaches Anheben am Verbindungspunkt geöffnet. Als nächster Arbeitsschritt gilt es, die Schraubenkupplung aufzuschrauben, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben.

Sind alle Trennstellen langgemacht und die Güterwagen vom Verschubpersonal kontrolliert, schiebt ein Triebfahrzeug die Güterwagen über den Abrollberg (abrollen). Am Verschiebersteig (befestigter Gehweg für das Verschubpersonal, Abbildung 1.7) des Abrollberges kontrolliert ein weiterer Mitarbeiter erneut die Wagennummern und die Trennstellen. Ist eine langgemachte Schraubenkupplung als korrekte Trennstelle identifiziert, so wird diese ausgehängt und die Schraubenkupplung gilt als erfolgreich getrennt.

Im Fehlerfall kommt es je nach Fehlerart zu einem Auslösen des Rollstopps (das Schieben über den Abrollberg wird abgebrochen und die Güterwagen abgebremst). Nachfolgend eine Auflistung möglicher Fehler und Behebungsmaßnahmen:

- Trennstelle nicht oder nicht ausreichend langgemacht \Rightarrow Rollstopp, Langmachen und Entkuppeln dieser Schraubenkupplung erfolgt direkt am stehenden Zug
- Falsche Trennstelle langgemacht \Rightarrow Im Rahmen der Zugbildung in der Richtungsgruppe wird diese erneut ordnungsgemäß verbunden
- Bremse eines Wagens ist ausgelöst \Rightarrow Rollstopp, Lösen der Bremse
- Falsche Wagenreihung \Rightarrow Rollstopp, Korrektur der Daten
- Schraubenkupplung ist gespannt und kann nicht entkuppelt werden \Rightarrow Rollstopp, Entkuppelung muss in größerer Entfernung zur Bergkuppe erfolgen. Dieser Fall tritt bei entsprechender Länge der Wagengruppe ein, wenn die vorderen Güterwagen bereits über die Bergkuppe hinweggefahren sind und diese mehr Masse als die restlichen Güterwagen (bis zur Trennstelle) besitzen. Die Güterwagen ziehen somit an der Schraubenkupplung, wodurch diese gespannt wird.

Im Anschluss an die Fehlerbehebung findet die Fortsetzung des Abrollvorganges statt. Der Trennprozess ist abgeschlossen, sobald alle Güterwagen des Zuges über den Abrollberg gerollt sind.

Zusammengefasst beeinflussen folgende Parameter die Abläufe des Trennprozesses, die in Kapitel 4 genauer erfasst werden:

- Anzahl der Güterwagen pro Zug (Langmachen)
Unter anderem für die zurückzulegende Fahrstrecke und der Anzahl der zu betätigenden Lösezüge notwendig
- Anzahl der Trennstellen (Langmachen)
Häufigkeit einer Trennung des Zuges
- Länge der Güterwagen (Entkuppeln)
Daraus lässt sich der Abstand zwischen den Trennstellen ermittelt
- Fahrgeschwindigkeit (Entkuppeln)
- Wagenreihung (Langmachen, Entkuppeln)
Für den korrekten Ablauf und zur Überprüfung
- Zulässige Zeitdauer (Langmachen, Entkuppeln)
- Anzahl der Gleise (Langmachen, Entkuppeln)

3.2 ANALYSE DER GEOMETRISCHEN GEgebenHEITEN

3.2.1 RÄUMLICHE VERHÄLTNISSe

Für die Entwicklung einer mechanischen Konstruktion zum Trennen der Schraubenkuppung ist der Berner-Raum die Maßgabe für den zur Verfügung stehen Arbeitsraum. Dieser Raum definiert die Mindestmaße die zwischen den Puffern und der Schraubenkuppung garantiert für den Mitarbeiter und somit auch für einen Mechanismus zur Verfügung stehen (siehe dazu Abbildung 3.5). Die beiden nebeneinanderliegenden Freiräume von mindestens 600 mm Tiefe, 400 mm Breite und 2000 mm Höhe geben den Bereich vor, in dem sich ein Mechanismus ungehindert bewegen kann. Allerdings entstehen zusätzliche Einschränkungen des verfügbaren Raumes durch herabhängende beziehungsweise gekuppelte Bremsschläuche zwischen den Güterwagen, die quer durch den Berner-Raum verlaufen. In der Regel ist der tatsächliche freie Raum zwar größer, jedoch ist dies nicht garantiert (Abbildung 3.6).

Der Bereich zwischen den Güterwagen kann zum Beispiel durch einen Übergang für Verschubmitarbeiter oder einen Überpufferungsschutz eingeschränkt werden (Abbildung 3.6 und 3.7). Diese verschmälern insbesondere den Bereich über den Puffern. Anhand von durchgeführten Messungen an einer Vielzahl verschiedener Güterwagen am Verschiebebahnhof Linz konnte eine minimale Durchgangslichte, über den Puffern und entlang der gesamten Güterwagenbreite, von 380 mm festgestellt werden (Tabelle 3.1).

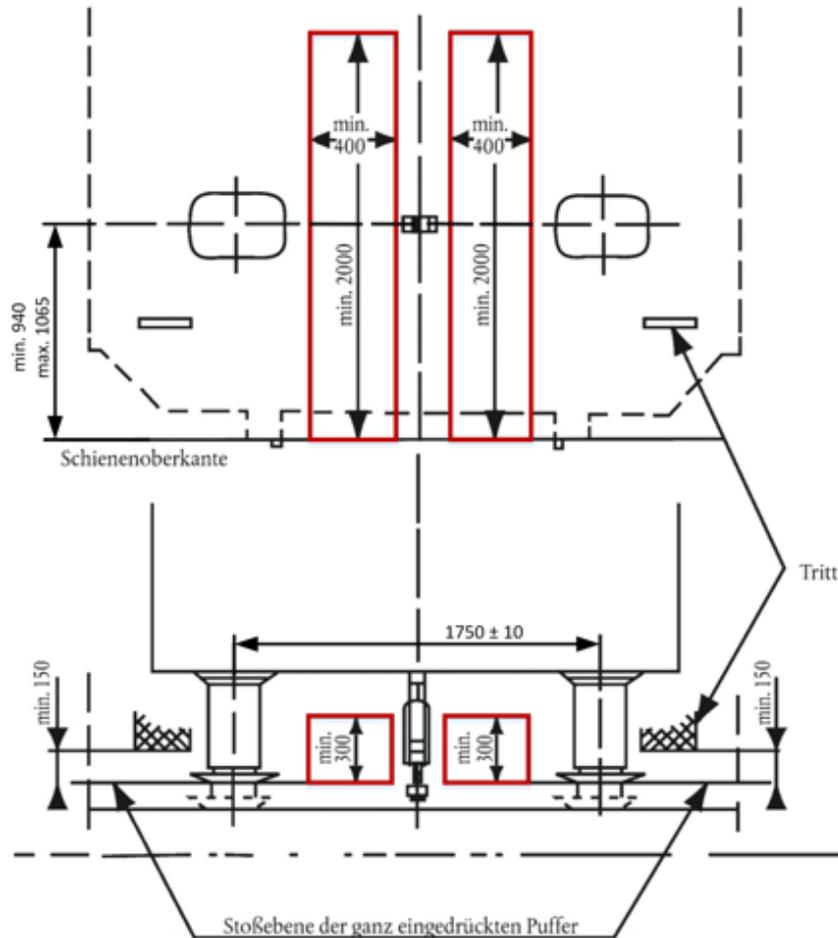


Abbildung 3.5: Berner-Raum (rote Markierung) [vgl. 39, S.11], Position der Schraubenkupplung und der Puffer an Güterwagen [vgl. 40, S.50], Maße in [mm]

Unterhalb der Puffer kann die Durchgangslichte unter anderem durch Verschiebertritte (Abbildung 3.5) und Verschiebergriffe (Abbildung 3.6 und 3.7) eingeschränkt werden. Dabei muss die Durchgangslichte mindestens 300 mm aufweisen, siehe Abbildung 3.5. Die Einhaltung dieser Vorgabe kann auf Basis der Messungen (Tabelle 3.1) bestätigt werden.

Die Höhe der Puffer und der Schraubenkupplung über SOK sowie der Abstand zwischen den Puffern wird zum Teil in der Eisenbahn-Bau- und Betriebsverordnung (EisbBBV) der jeweiligen Länder definiert. So findet sich in der österreichischen Verordnung keine Festlegung, aber in der deutschen Variante sehr wohl (Abbildung 3.5). Diese gibt eine Höhe von 940 mm - 1065 mm vor. Allerdings zeigten Messungen an Güterwagen (Tabelle 3.1), dass insbesondere an leeren Güterwagen die maximale Höhe um bis zu 90 mm überschritten wird.



(a) Freier Kupplungsbereich, Sicht von Oben



(b) Güterwagen mit Übergang

Abbildung 3.6: Verschiedene Aufnahmen des Kupplungsbereiches und des Berner-Raumes



(a) Übergänge



(b) Überpufferungsschutz

Abbildung 3.7: Weitere Aufnahmen des Kupplungsbereiches

Zur Überprüfung der verschiedenen angeführten Vorschriften und zur Erfassung weiterer Maße erfolgten Messungen an einer Vielzahl verschiedener Güterwagen mit unterschiedlichem Aufbau am Verschiebebahnhof Linz. Ein Auszug der Ergebnisse ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

	Lösezughöhe über SOK	Höhe Zughaken (SOK - Bolzenmitte)	Pufferlänge	Durchgangslichte über Puffer	Durchgangslichte unter Puffer	Abstand Zughaken / Bremsschlauchmitte
Minimum	455	955	600	380	440	250
Maximum	1625	1155	670	1320	1340	550
∅	670	1024	626	804	804	329

Tabelle 3.1: Ergebnisse von Messungen an Güterwagen, Maße in [mm], gemessene Güterwagen: 37

Für potentielle Einbauten, beziehungsweise für verfahrenende Trennvorrichtungen sind neben dem Berner-Raum die Begrenzungslinien des Zuges von entscheidender Bedeutung. Diese sind in EN 15273-2 definiert (vereinfacht dargestellt in Abbildung 3.9). Die Begrenzungslinien geben die maximal zulässigen Maße von Güterwagen et cetera an. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen statischer und kinematischer Begrenzungslinie. Die statische Begrenzungslinie G1 findet Anwendung in Bereichen, in denen sich der Zug im Stillstand befindet. Im Gegensatz dazu ist die kinematische Begrenzungslinie G1 (Anmerkung: beide Begrenzungslinien werden in der Norm als G1 bezeichnet) anzuwenden, sobald der Zug in Bewegung versetzt wird oder der Neigungskoeffizient (s) 0,2 überschreitet. Der Neigungskoeffizient ist der Quotient aus dem Winkel Wagenkasten zu Gleis (η) und dem Winkel Gleis zu Horizontale (δ) ($s = \frac{\eta}{\delta}$, Abbildung 3.8).

Beide Begrenzungslinien sind sich sehr ähnlich, jedoch sind bei der kinematischen etwas größere Bereiche in der Breite für die Güterwagen freizuhalten (zirka 70 mm mehr). Durch diese Erweiterung werden etwaige Bewegungen und Neigungen der Güterwagen berücksichtigt. Da ein Entkuppeln an fahrenden Zügen stattfinden soll und Züge am Nachbargleis vorbeifahren können, ist im Folgenden nur die kinematische Begrenzungslinie G1 berücksichtigt.

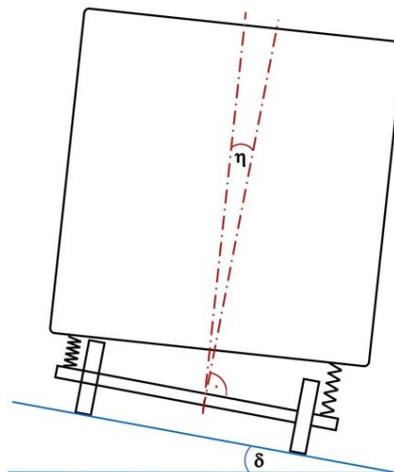


Abbildung 3.8: Schematische Skizze des Neigungskoeffizienten

Zusätzlich kommt es zu einer weiteren Einschränkung des zur Verfügung stehenden Raums durch den freizuhaltenen seitlichen Sicherheitsabstand an fahrenden Zügen. Dieser ist notwendig, um am Zug mitfahrende Vershubmitarbeiter durch Einbauten nicht zu gefährden. Sind außerdem Tätigkeiten durch Vershubmitarbeiter am stehenden Zug durchzuführen, so ist auf der jeweiligen Seite der Bedienungsraum unbedingt freizuhalten. Durch die Freihaltung des Bedienungsraumes ist die Begehbarkeit und ausreichend Platz für Arbeitsvorgänge sichergestellt. Zur Veranschaulichung sind beide Bereiche in Abbildung 3.9 visualisiert. Diese vorangegangenen Maße und Begrenzungen dienen im Weiteren als Grundlage für die Entwicklung geeigneter Konzepte.

In Abbildung 3.9 ist der zur Verfügung stehende Raum zwischen und innerhalb der Gleise dargestellt. Hierfür wird ein Gleisabstand von 4,5 m zwischen zwei Gleisen angenommen (Anmerkung: innerhalb des Gleises gibt es unterhalb der SOK bis auf die Güterwagenräder und der Rippenplatten zur Befestigung der Schienen keine Einschränkungen). Durch die verschiedene Nutzung der Gleise des Verschiebebahnhofes kommt es zu weiteren Einschränkungen im Gleisbereich. So kann der nutzbare Bereich zwischen den Gleisen durch Bedienungsraum und Sicherheitsabstände stark beschränkt werden. Dies ergibt sich zum Beispiel in Abhängigkeit davon, ob innerhalb des Gleises Verschieber durchgehen oder Tätigkeiten verrichten müssen. Folgende Varianten können dabei auftreten:

- **V1:** Der Bereich zwischen den Gleisen ist für Verschieber gesperrt.
- **V2:** Der Bereich ist für Verschieber gesperrt, aber Verschieber können entweder am zu behandelnden oder am Zug des Nachbargleises mitfahren.
- **V3:** Der Bereich ist für Verschieber gesperrt, aber Verschieber können an beiden Zügen mitfahren.
- **V4:** Der Bereich ist für Verschieber zugänglich.

Daraus folgen zusätzlich zur Begrenzungslinie G1 folgende Einschränkungen für die jeweilige Variante:

- **V1:** Keine weiteren Einschränkungen.
- **V2:** Zusätzlich zur Begrenzungslinie G1 ist der Sicherheitsabstand des jeweiligen Zuges einzuhalten. Die minimale Breite des freien Raumes beträgt 0,655m und liegt unsymmetrisch.
- **V3:** Es sind die Sicherheitsabstände beider Züge einzuhalten. Die minimale Breite des freien Raumes beträgt 0,1m und liegt symmetrisch zwischen den beiden Gleisen.

- **V4:** Die Bedienräume beider Gleise überlappen sich, somit gibt es keinen freien Raum zwischen den Gleisen. Ein automatisches Trennen ist in diesem Bereich unmöglich.

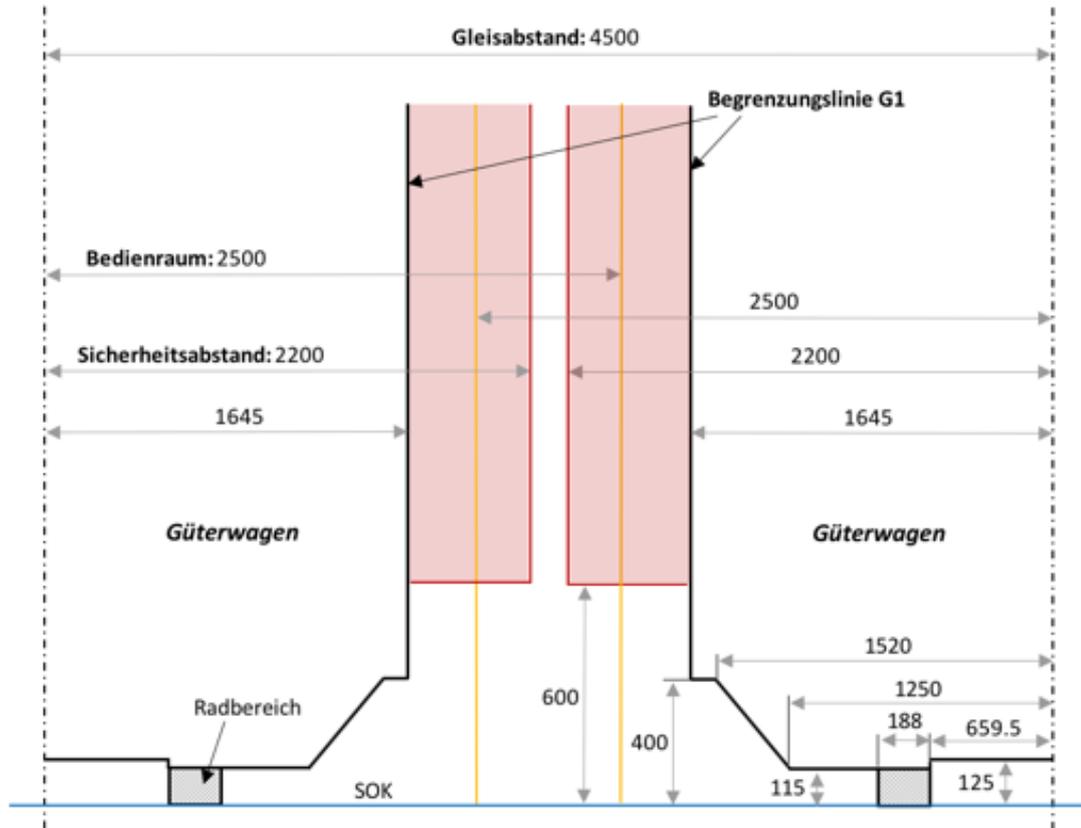


Abbildung 3.9: Vereinfachte Skizze der Begrenzungslinie G1 und der Sicherheitsabstände zwischen 2 Gleisen, Maße in [mm], nicht maßstäblich, [vgl. 41, S.22f]

Die Art des Betriebes ist daher von entscheidender Bedeutung für die geometrischen Verhältnisse. Aus diesen Einschränkungen ist klar ersichtlich, dass ein fester Einbau einer Trennvorrichtung zwischen den Gleisen nur möglich ist, wenn der Bereich für die Verschieber nicht zugänglich ist. Für den Fall, dass Verschieber am Zug mitfahren, muss die Trennvorrichtung so gestaltet sein, dass der jeweilige Sicherheitsabstand eingehalten wird.

Um die Schraubenkupplung erfolgreich zu trennen, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die einen Zugriff für die Handhabung, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Grenzen und Einschränkungen, zulässt. Etwaige Möglichkeiten erscheinen hierbei deutlich begrenzt. Ein Zugriff in Längsrichtung, von vorne oder hinten, ist durch die Güterwagen ausgeschlossen. Ebenso ist ein seitlicher Zugriff, beschränkt durch die Puffer, unmöglich.

Letztlich bleiben somit nur die beiden Möglichkeiten, oben und unten, wobei bei einem Zugriff von oben, der verfügbare Raum noch durch vorhandene Oberleitungen begrenzt wird. Diese befinden sich mindestens 4950 mm über SOK. Es muss ein Sicherheitsabstand von mindestens 1,5 m zu den Oberleitungen eingehalten werden (Vorgabe ÖBB-Österreichische Bundesbahnen, geltende Bestimmungen zu Sicherheitsabständen für Bahnstromanlagen), woraus eine nutzbare Höhe über SOK von 3450 mm resultiert. Durch die Fahrt von Zügen mit Stromabnehmern ist der Bereich unter der Oberleitung nicht nutzbar.

Ein Zugriff von unten muss in einer Art und Weise erfolgen, sodass über einen gegebenenfalls im Gleisbett verbauten Mechanismus ein darüber hinweg fahrender Zug ohne Kollision passieren kann. Maßgeblich hierfür wäre die SOK, unterhalb derer ausgeschlossen werden kann, dass sich Wagenelemente befinden (Anmerkung: nach ÖNORM EN 15273-2 befindet sich die Begrenzungslinie 125 mm über der SOK, Abbildung 3.9). Basierend auf Besichtigungen von Verschiebebahnhöfen zeigte sich allerdings, dass die Begrenzungslinie in diesem Bereich nicht eingehalten wird. So sind häufig Schraubenkupplungen und Bremsschläuche unversorgt (siehe Abbildung 3.10 und 3.11) und hängen deutlich tiefer (bis zu 60 mm unter SOK). Somit muss innerhalb des Gleises eine sehr flache Bauweise erfolgen ($< SOK - 60\text{ mm}$, in der Regel liegt die SOK 160 mm bis 190 mm über den Bahnschwellen) oder die Konstruktion herabhängende Schraubenkupplungen und Bremsschläuche tolerieren.

Letztlich lässt sich ein Zugriff auch kombiniert realisieren, wie zum Beispiel: Mechanismus befindet sich seitlich neben dem Zug und hebt seitlich von oben oder unten eine Trennvorrichtung zur Schraubenkupplung.



(a) Angeschlagenes Schutzblech



(b) Schraubenkupplung und Bremsschlauch unversorgt, Höhe SOK

Abbildung 3.10: Verletzung der Begrenzungslinie G1 durch Schraubenkupplung und Bremsschlauch

3.2.2 SCHRAUBENKUPPLUNG

Jeder Güterwagen ist an beiden Enden mit einer vollwertigen Schraubenkupplung ausgestattet, deren Masse nach ÖNORM EN 15566-2011 36 kg (Arbeitnehmerschutz) nicht übersteigen darf. Die Schraubenkupplung ist auf eine Lebensdauer von 30 Jahren ausgelegt, die Mindestbruchkraft (3 Kategorien) liegt bei mindestens 0,85 MN. Um zwei Güterwagen miteinander zu verbinden, wird jeweils eine der beiden möglichen verwendet, die zweite wird in der Regel in einer Halterung versorgt (verdeutlicht in Abbildung 3.11). Dies führt dazu, dass in Abhängigkeit der verwendeten Schraubenkupplung, ein Aufschrauben im oder gegen den Uhrzeigersinn erfolgt.



(a) Versorgt



(b) Unversorgt

Abbildung 3.11: Versorgte und unversorgte Schraubenkupplung

Wird die Schraubenkupplung langgemacht, so vergrößert sich ihr Durchhang mit jeder Umdrehung (siehe Kapitel 4.3.1). Deshalb muss eine Trennvorrichtung die Möglichkeit besitzen, die Höhe zur Schraubenkupplung zu variieren und an den Durchhang anzupassen. In Versuchen wurde ermittelt, dass 5 Umdrehungen notwendig sind, um die Schraubenkupplung sicher zu entkuppeln. Dieser Wert gilt sofern die Puffer der Güterwagen sich berühren, aber nicht eingedrückt sind und die Schraubenkupplung gespannt ist.

Um die Schraubenkupplung auszuhängen muss nur der Kupplungsbügel aus dem Zughaken gehoben werden. Es kann jedoch vorkommen, dass sich der Kupplungsbügel im Zughaken verhängt, bedingt durch die Zughakengeometrie (erkenntlich in Abbildung 3.12). Aufgrund dessen sollte der Kupplungsbügel während des Entkuppelns leicht nach oben gedrückt werden. Dadurch kann der Kupplungsbügel entlang des Zughakens gleiten und es besteht keine Gefahr für ein Verhängen.

Die Tatsache der mehrfach gelenkigen Ausführung der Schraubenkupplung bietet weiteres Konflikt- und Problempotential bei der Automatisierung (Abbildung 4.3). Die Schraubenkupplung besteht vereinfacht aus drei Starrkörpern, die in der Ebene gelenkig miteinander verbunden sind. Es ergeben sich somit drei Freiheitsgrade. Durch den eingehängten Kupplungsbügel im Zughaken kommt es zu einer Reduktion um einen Freiheitsgrad. Somit besitzt eine eingehängte Schraubenkupplung zwei Freiheitsgrade. Ein Herausheben muss auf eine kontrollierte Art und Weise erfolgen, sodass der Bügel aus dem Zughaken ausfädelt und sich nicht verhängt.



Abbildung 3.12: Bild eines Zughakens (problematische Geometrie siehe Markierung)

Als einer der schwierigsten Punkte im Langmach-Prozess erscheint das Greifen des Kupplungsschwengels, für den drei Geometrien dokumentiert sind, ersichtlich in Abbildung 3.13. Grundsätzlich stehen drei sogenannte Sicherungspositionen zur Verfügung (Abbildung 3.14 und 1.2), die die Position des Kupplungsschwengels vorgeben. Die verschiedenen Sicherungspositionen beziehen sich grundsätzlich auf eine Kupplungsschwengelart. So gilt die Sicherungsposition (a) für den flachen Kupplungsschwengel mit Griffausnehmung, Sicherungsposition (b) für konische und Sicherungsposition (c) für kugelförmige Kupplungsschwengel. Allerdings wird durch Vorortbesichtigungen von Bahnhöfen deutlich, dass der Kupplungsschwengel sowohl für die jeweilige Art nicht vorgesehene Sicherungspositionen, als auch undefinierte Positionen einnehmen kann (siehe Abbildung 3.15). Ebenso können Sonderformen auftreten. Somit ist die Entwicklung einer möglichst vielseitigen und robusten Mechanik nötig, die ein Greifen des Kupplungsschwengels mit höchster Wahrscheinlichkeit sicher stellt.

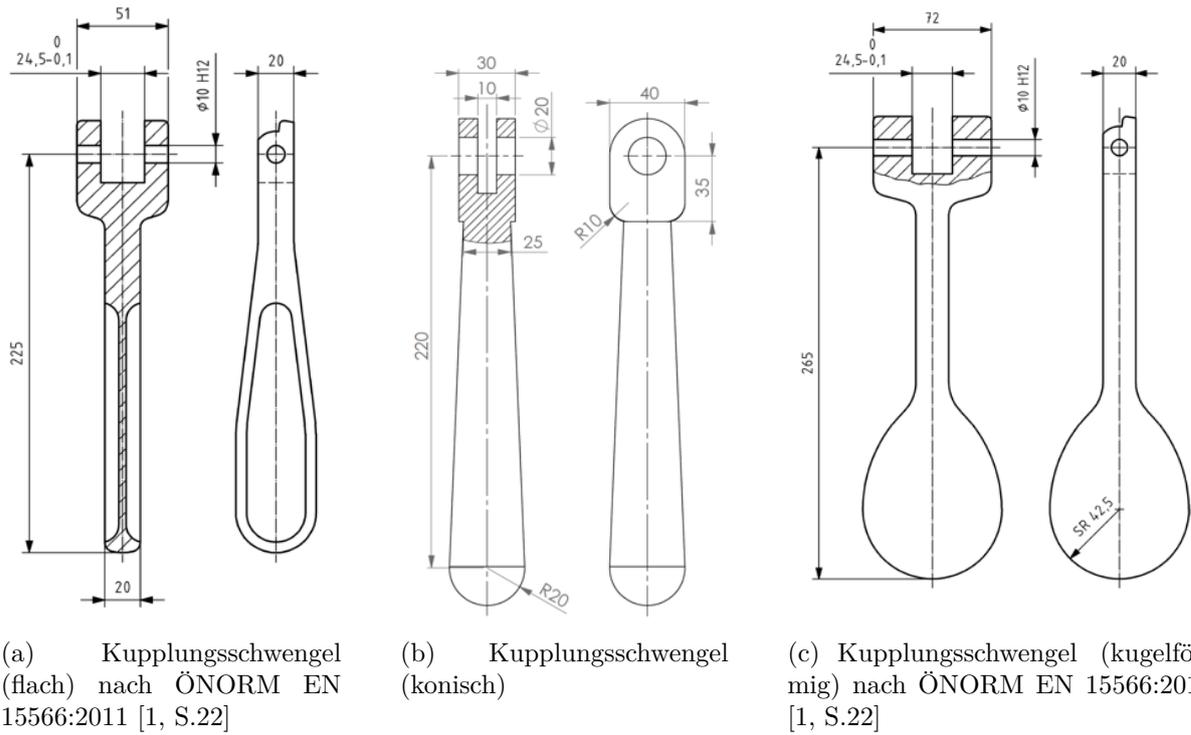


Abbildung 3.13: Skizze der Kupplungsschwengelarten, Maße in [mm]



(a) Oben liegend (flach) (b) Im Sicherungshaken (konisch) (c) Freihängend nach unten (kugelförmig)

Abbildung 3.14: Zulässige Sicherungspositionen von Kupplungsschwengeln



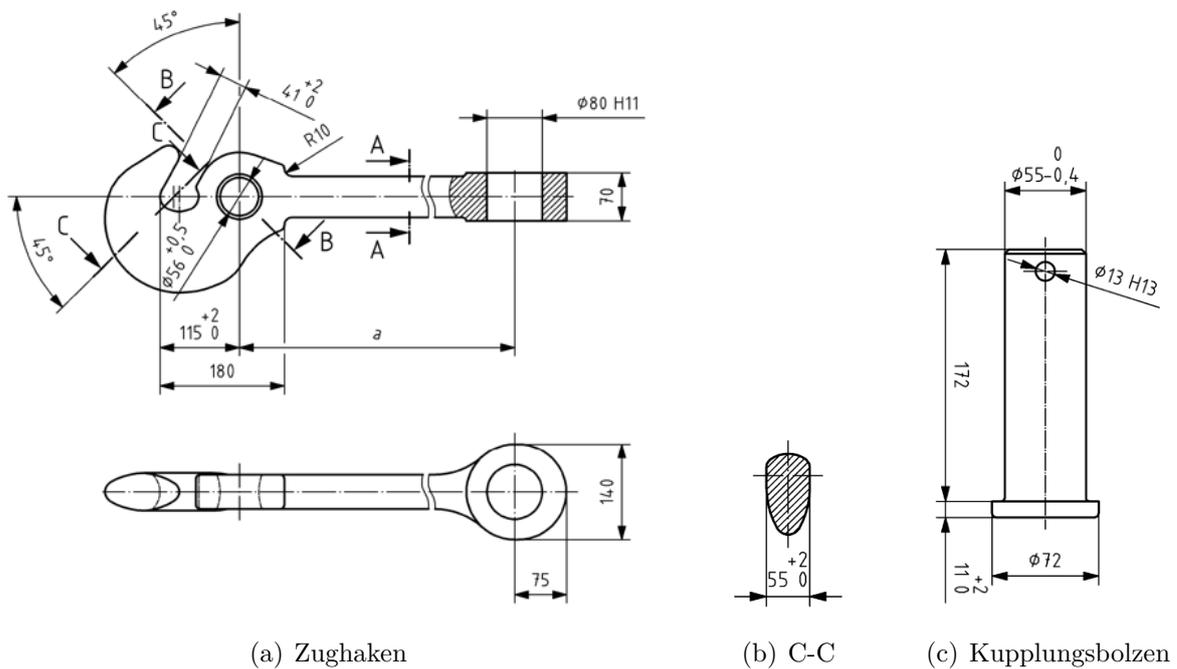
(a) Falsche Sicherungsposition



(b) Undefinierte Form

Abbildung 3.15: Sonderfälle Kupplungsschwengel

In Abbildung 3.16, 3.17 und 3.18 finden sich einzelne Elemente der Schraubenkupplung, inklusive Maße. Als effektives Maximalmaß der Breite kann in etwa die Länge des Kupplungsbolzens (zirka 183 mm) herangezogen werden.



(a) Zughaken

(b) C-C

(c) Kupplungsbolzen

Abbildung 3.16: Maße der Schraubenkupplung (in [mm]), Zughaken / Kupplungsbolzen [1, S.16ff]

a...530/575mm

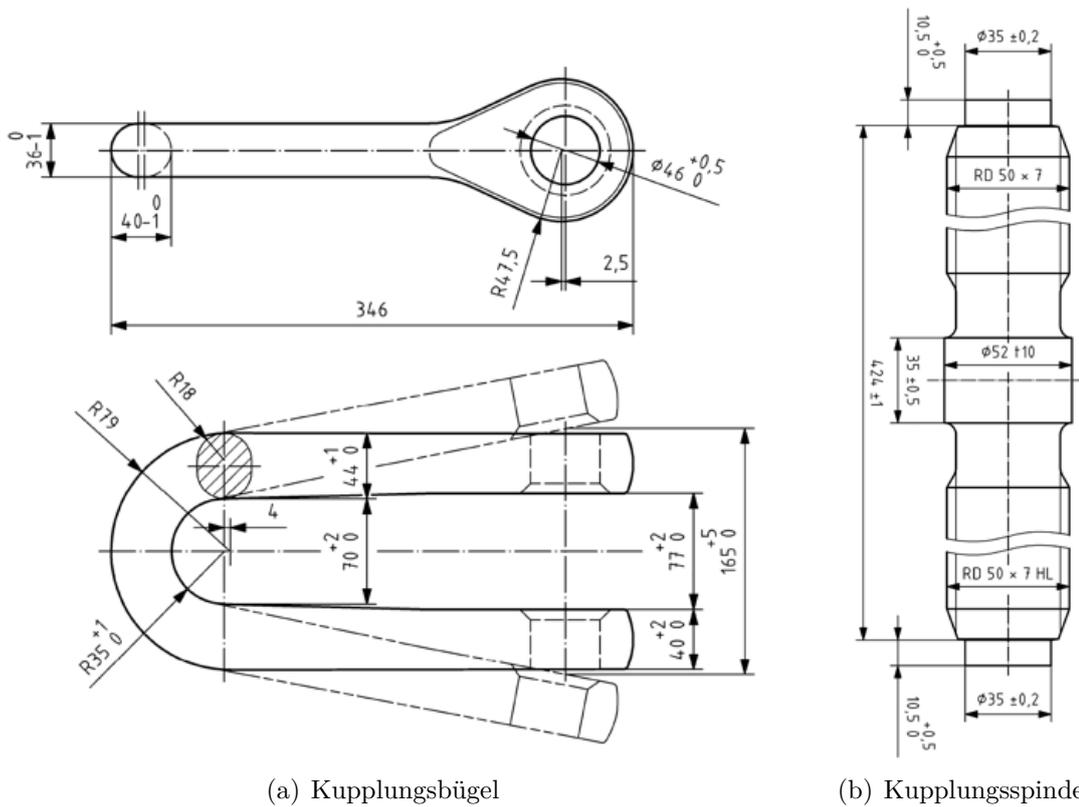


Abbildung 3.17: Maße der Schraubekupplung (in [mm]), Kupplungsbügel / Kupplungsspindel [1, S.20ff]

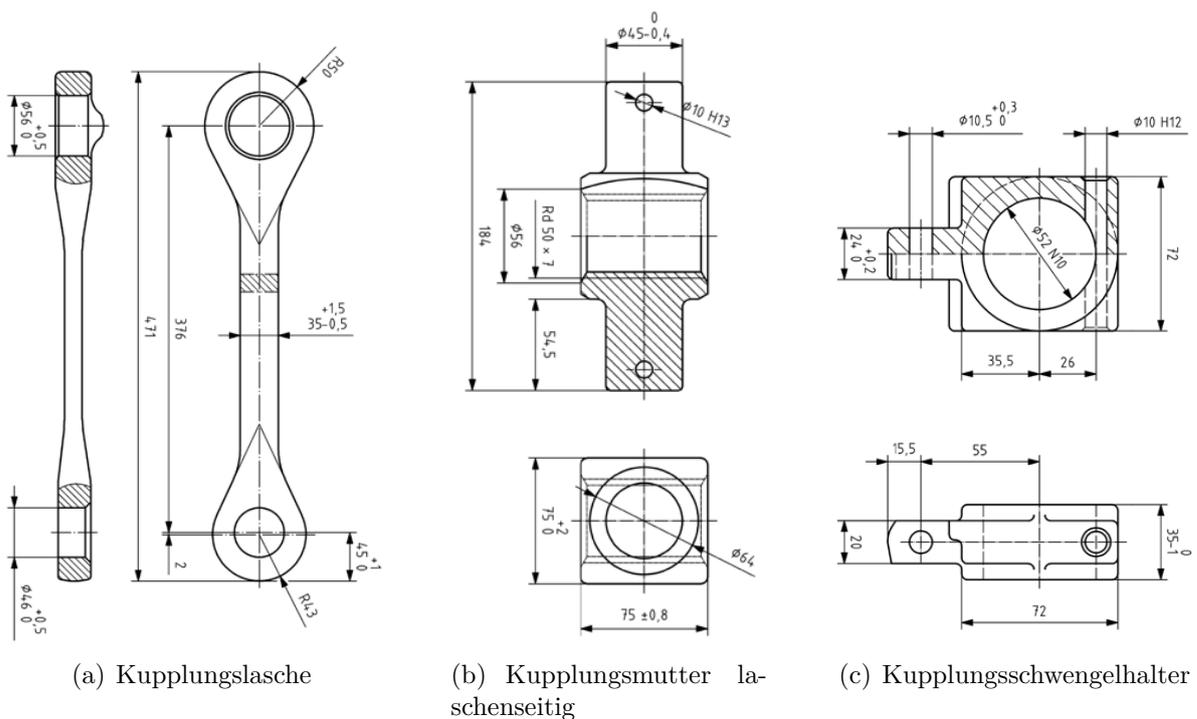


Abbildung 3.18: Maße der Schraubekupplung (in [mm]), Kupplungslasche / Kupplungsmutter / Kupplungsschwengelhalter [1, S.19ff]

3.2.3 BREMSSCHLÄUCHE

Die Bremsschläuche dienen dazu, die Druckluft zwischen den Güterwagen zu verteilen, um so die Bremsen der Güterwagen betätigen zu können. Pro Verbindung zwischen zwei Güterwagen sind deshalb mindestens zwei Bremsschläuche durch einen Bajonettverschluss verbunden. Der Aufbau und die Maße eines Bremsschlauches sind in Abbildung 3.19 veranschaulicht. Die verschiedenen Ausführungen der Güterwagen, es können jeweils ein, zwei, drei oder vier Bremsschläuche verbaut sein, führen dazu, dass abhängig von den zu verbindenden Güterwagen die Bremsschläuche unterschiedlich verbunden werden können (dargestellt in Abbildung 3.20). Zusätzlich zu den dargestellten Verbindungsmöglichkeiten können auch Mischformen auftreten. Daher ist es nötig, für alle Varianten eine Lösung für das Öffnen der Bremsschläuche zu finden. Damit die Verbindung der Bremsschläuche gelöst werden kann, ist im Wesentlichen nur ein Anheben am Verbindungspunkt, dem Bajonettverschluss, notwendig. Von Vorteil ist hierbei die Tatsache, dass bei allen Kombinationen der Verbindungspunkt in der selben Ebene (siehe Abbildung 3.20), die Ebene der Pufferplatten, liegt. Bei der Lösungssuche nach geeigneten Konzepten zur Öffnung ist die zum Teil auftretende Schwergängigkeit des Verschlusses und die Elastizität der Schläuche zu beachten. Bei den diagonal verbundenen Bremsschläuchen ist die darüber liegende Schraubenkupplung mitunter hinderlich.

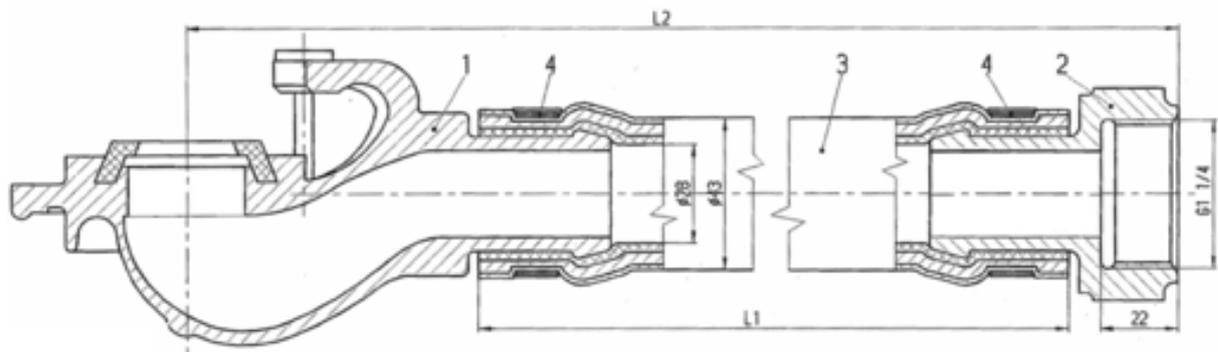


Abbildung 3.19: Abmessungen eines typischen Bremsschlauches [vgl. 42]

$L1 \dots 620/800\text{mm}$, $L2 \dots 725/905\text{mm}$, 1...Bajonettverschluss, 2...Anschlussmutter, 3...Schlauch,
4...Klemme

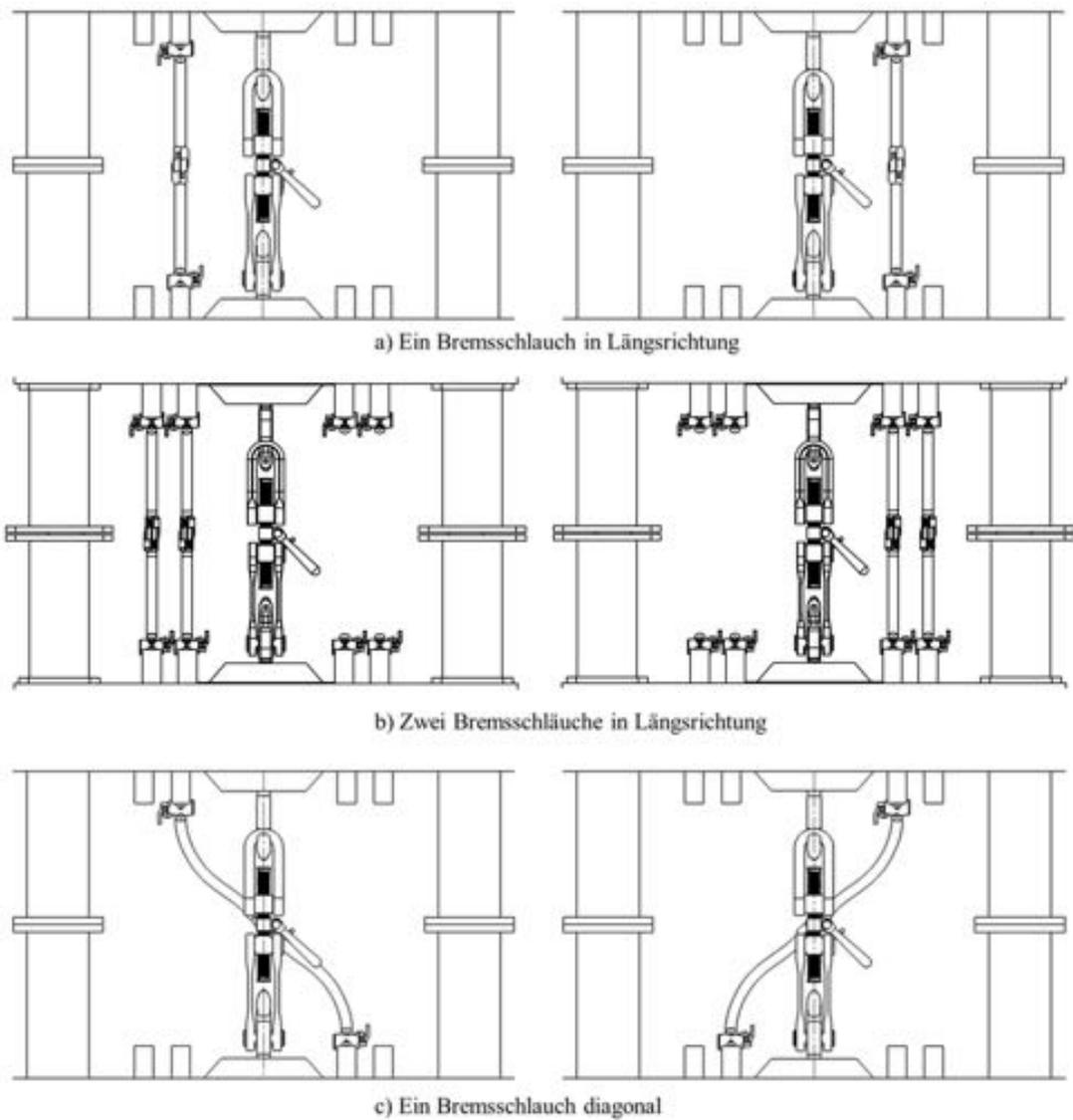


Abbildung 3.20: Darstellung der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten der Bremsschläuche [vgl. 43, S.36]

4 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DAS AUTOMATISCHE TRENNEN

Die Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 wird in sieben Arbeitsschritten aufgeteilt. Jeder Arbeitsschritt liefert ein Arbeitsergebnis, auf dem die nachfolgenden Schritte aufbauen. Der genaue Ablauf ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

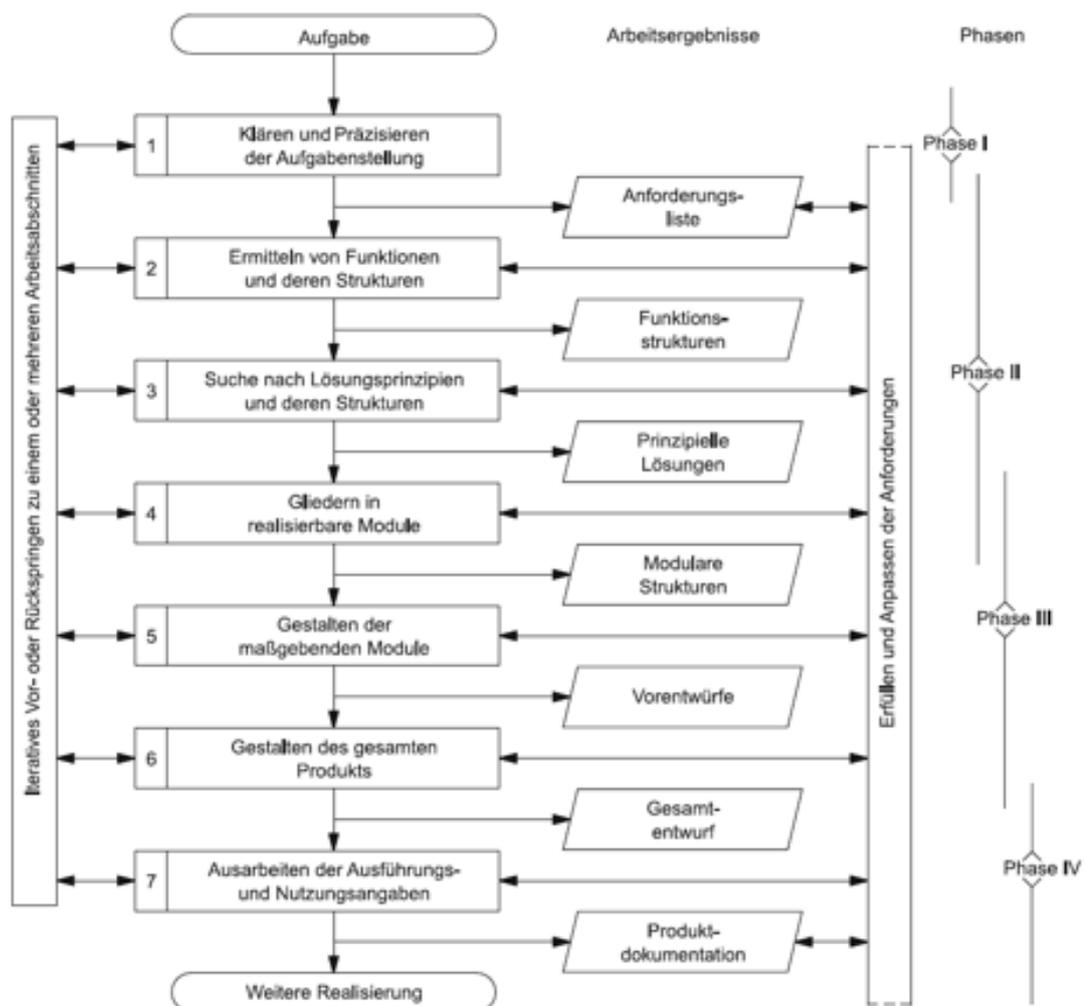


Abbildung 4.1: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221, 1993 zit. n. 44, S.18]

Der erste Schritt im Produktentwicklungsprozess besteht im Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung (siehe Abbildung 4.1). Dabei gilt es die maßgeblichen lösungs- und gestaltbeeinflussenden Anforderungen zu erkennen und in einer Anforderungsliste zu dokumentieren (möglichst quantitativ). Die Anforderungsliste ist die Zusammenstellung sämtlicher Anforderungen und beinhaltet somit nicht nur Anforderungen aus dem Lasten- und Pflichtenheft, sondern zum Beispiel auch Gesetze, Standards oder Vorschriften die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. [vgl. 44, S.319f]

Für die Erarbeitung einer Anforderungsliste stehen definierte Abläufe (Abbildung 4.2) zur Verfügung. Zuerst sind mögliche Anforderungsquellen und deren Anforderungen zu ermitteln (zum Beispiel Kundenanforderungen). Im nächsten Schritt werden mit Hilfe spezieller Methoden (wie Hauptmerkmalsliste, Szenariotechnik,...) weitere Anforderungen bestimmt. [vgl. 44, S.325f]

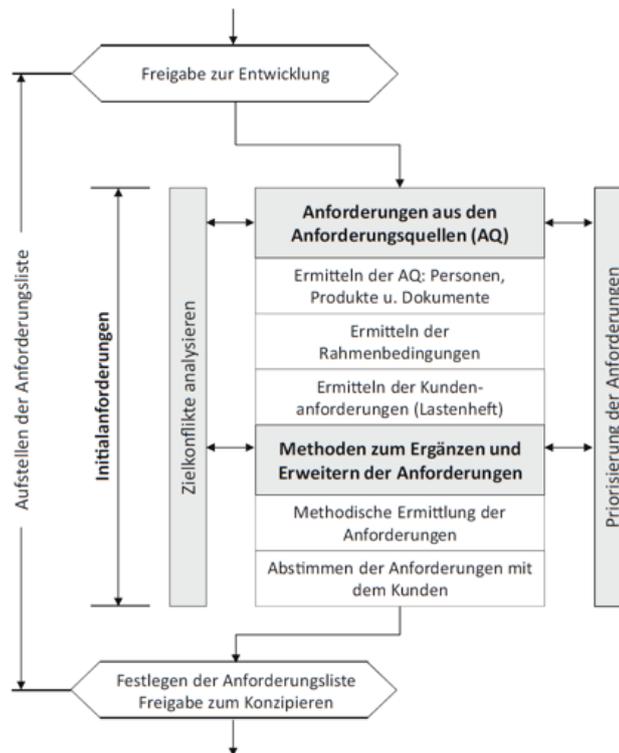


Abbildung 4.2: Hauptarbeitsschritte zum Aufstellen der Anforderungsliste [44, S.326]

Die Erstellung der Anforderungsliste für das automatische Trennen erfolgte auf Basis der gezeigten Hauptarbeitsschritte (Abbildung 4.2) sowie anhand der Analyse der bestehenden Abläufe und Gegebenheiten (siehe Kapitel 3). In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst die notwendigen Parameter dargelegt sowie grundlegende Berechnungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt. Ergänzt durch konkrete Anforderungen führen diese zur Anforderungsliste für eine automatische Trennvorrichtung.

4.1 BESTIMMUNG DER NOTWENDIGEN PARAMETER

Für das automatische Trennen gilt es zuerst die dafür notwendigen Parameter zu eruiieren. Damit eine automatische Trennung der Güterwagen stattfinden kann, sind verschiedene Informationen von entscheidender Bedeutung. Zuerst muss die automatische Trennvorrichtung Daten darüber erhalten, welcher Zug zu behandeln ist und an welchen Positionen (Trennstellen) die Güterwagen getrennt werden müssen. Basierend auf diesen Daten gilt es nachfolgend, die entsprechenden Trennstellen zu lokalisieren. Dazu sind grundsätzlich die Daten der Zerlegeliste und die örtliche Bestimmung der jeweiligen Güterwagen notwendig. Die örtliche Bestimmung kann dabei auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, siehe Kapitel 6.

Sind die Trennstellen bekannt, so muss im nächsten Schritt die Schraubenkupplung erkannt, deren Position sowie Status (langgemacht oder nicht langgemacht,...) ermittelt und diese Informationen auf Plausibilität überprüft werden. Wobei die Erkennung berührungsfrei erfolgen soll. Für die Erkennung des Kupplungsbereiches bieten sich verschiedene geometrische Merkmale von Zughaken, Kupplungsschwengel, Bremsschläuche und den Puffern an. Entlang des gesamten Zuges sind die Lösezüge aller Güterwagen zu betätigen. Als Basis für die automatische Betätigung werden die genaue Position des Lösezuges und seine Orientierung benötigt. Für die Erkennung von Kupplungsbereich und Lösezug kommen verschiedene Sensorsysteme infrage, deren Potentiale in Kapitel 6 genauer erörtert werden.

Im Fall, dass das Entkuppeln am fahrenden Zug durchgeführt wird, ist die genaue Ermittlung der Kupplungsposition und -geschwindigkeit von essentieller Bedeutung. Die Toleranz der Mechanik, innerhalb derer ein problemloser Betrieb gewährleistet ist, gibt die nötige Positionsgenauigkeit vor. Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung ist nur in jenem Abschnitt entscheidend, in dem keine Positionsbestimmung stattfindet. In diesem Abschnitt lässt sich die Position der Schraubenkupplung nur anhand der gemessenen Geschwindigkeit, durch Integration, errechnen.

Weitere Parameter wie die Beschleunigungswerte des Zuges wären für die weitere Datenverarbeitung und Auswertung äußerst hilfreich, allerdings erscheint eine Bestimmung derselben äußerst schwierig, da an den Güterwagen keinerlei Umbaumaßnahmen erwünscht sind.

Zusammengefasst sind folgende Informationen und Parameter von hoher Wichtigkeit:

- Welche Trennstellen sind zu berücksichtigen und an welchen Positionen befinden sich diese

- Kupplungsposition
- Kupplungsgeschwindigkeit
- Status der Schraubenkupplung
- Lösezugsposition

4.2 ABSCHÄTZUNG DES ERREICHBAREN AUTOMATISIERUNGSGRADES

In der nachfolgenden Tabelle 4.1 werden die einzelnen Tätigkeiten des Trennens aufgelistet. Für diese Tätigkeiten ist jeweils der Grad der körperlichen Anstrengung, der voraussichtlich erreichbare Automatisierungsgrad sowie der Zeithorizont der Realisierung eingetragen. Ein aktueller Automatisierungsgrad ist nicht angeführt, da dieser für alle Tätigkeiten derzeit 0 % beträgt. Der Automatisierungsgrad gibt das Verhältnis von automatisch ablaufenden Vorgängen und manuellen Tätigkeiten an. So bedeutet zum Beispiel ein Automatisierungsgrad von 90 %, dass 90 % der Tätigkeiten automatisiert ablaufen und ein Anteil von 10 % an manuellen Tätigkeiten notwendig ist.

Die aufgelisteten Tätigkeiten von Tabelle 4.1 bieten unter anderem eine Gegenüberstellung von körperlicher Anstrengung und erreichbarem Automatisierungsgrad. Besonders bei körperlich anstrengenden Tätigkeiten ist ein hoher Automatisierungsgrad erstrebenswert. Die erreichbaren Automatisierungsgrade wurden auf Basis der bisherigen Erkenntnisse und Beobachtungen (zirka 520 Güterwagen) ermittelt. Besonders für die Tätigkeiten „Identifizierung der Trennstelle“, „Öffnen der Bremsschläuche“ und allen Tätigkeiten des Entkuppelns zeigten sich im Zuge von Besichtigungen keine augenscheinlichen baulichen Sonderfälle, bei denen mit einem manuellen Handlungsbedarf zu rechnen ist. Der resultierende Automatisierungsgrad für den gesamten Trennprozess von $\geq 98,2\%$ und somit 1,8 manuellen Eingriffen pro 100 Trennprozessen erscheint für eine sich voll im Einsatz befindliche Trennvorrichtung noch deutlich zu niedrig und muss im Zuge der Produktentwicklung signifikant erhöht werden.

Tätigkeit	Körp. Anstrengung	Erreichbarer Automatisierungsgrad	Zeithorizont Realisierung
Langmachen			
Identifizierung der Trennstelle	gering	$\geq 99,9\%$	≤ 2019
Betätigung des Lösezuges	gering	$\geq \frac{517}{520} = 99,4\%$	≤ 2021
Öffnen der Bremsschläuche	mittel	$\geq 99,9\%$	≤ 2021
Positionierung des Kupplungsschwengels	gering	$\geq \frac{519}{520} = 99,8\%$	≤ 2021
Aufschrauben der Schraubenkupplung	hoch	$\geq 99,5\%$	≤ 2021
Langmachen gesamt	-	$99,9\% \cdot 99,4\% \cdot 99,9\% \cdot 99,8\% \cdot 99,5\% = 98,5\%$	≤ 2021
Entkuppeln			
Identifizierung der langgemachten Schraubenkupplung	gering	$\geq 99,9\%$	≤ 2019
Kontrolle der Trennstelle	gering	$\geq 99,9\%$	≤ 2019
Aushängen der Schraubenkupplung	hoch	$\geq 99,9\%$	≤ 2019
Entkuppeln gesamt	-	$99,9\% \cdot 99,9\% \cdot 99,9\% = 99,7\%$	≤ 2019
Gesamter Trennprozess			
Langmachen und Entkuppeln	-	$98,5\% \cdot 99,7\% = 98,2\%$	≤ 2021

Tabelle 4.1: Übersicht Automatisierungsgrade und Zeithorizont

Die Bestimmung der Anzahl an manuellen Eingriffen je Tätigkeit basiert unter anderem auf der Tatsache, dass aus wirtschaftlichen Gründen und aufgrund der technischen Machbarkeit Sonderfälle und Sonderformen vorerst bei der Automatisierung unberücksichtigt bleiben. In späterer Folge können auf Basis von detaillierteren Daten und einem höheren Wissensstand nach Bedarf bei der Automatisierung Sonderfälle auch erfasst werden. Die Begründungen für die erreichbaren Automatisierungsgrade sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tätigkeit	Anteil manueller Eingriffe	Begründung
Langmachen		
Identifizierung der Trennstelle	$\leq \frac{1}{1000}$	Berücksichtigung etwaiger Fehldetektionen, Softwarefehler, falsche Wagenreihung,... (Annahme)
Betätigung des Lösezuges	$\leq \frac{3}{520}$	Ermittelte Häufigkeit des Auftretens von Sonderfällen (siehe Kapitel 3.1)
Öffnen der Bremsschläuche	$\leq \frac{1}{1000}$	Berücksichtigung von nicht ermittelten Sonderfällen, erhöhter Schwergängigkeit / Klemmen, Fehlverhalten,... (Schätzung)
Positionierung des Kupplungsschwengels	$\leq \frac{1}{520}$	Aufgetretene Anzahl an Sonderformen. Kupplungsschwengel, die sich in einer undefinierten Position befinden, treten relativ häufig auf ($\sim \frac{1}{10}$) und müssen daher sinnvollerweise ohne Schwierigkeiten automatisch aufgerichtet werden können
Aufschrauben der Schraubenkupplung	$\leq \frac{2}{365}$	Erfolgt unter der Annahme, dass im Durchschnitt durch Vereisung (Eisregen), Einrosten, Störfälle,... an zwei Tagen im Jahr ein automatisches Aufschrauben nicht möglich ist
Entkuppeln		
Identifizierung der langgemachten Schraubenkupplung	$\leq \frac{1}{1000}$	Berücksichtigung etwaiger Fehldetektionen, Softwarefehler,... (Annahme)
Kontrolle der Trennstelle	$\leq \frac{1}{1000}$	Falsche Wagenreihung, falsche Schraubenkupplung langgemacht,... (Annahme)
Aushängen der Schraubenkupplung	$\leq \frac{1}{1000}$	Berücksichtigung eines Verklemmens des Kupplungsbügels im Zughaken, einer gespannten Schraubenkupplung (Kapitel 3.1), zu große Positionsabweichung,... (Annahme)

Tabelle 4.2: Anteil an manuellen Eingriffen je Tätigkeit

Aufgrund der Tatsache, dass das Langmachen am stehenden Zug stattfindet, wird eine Verfahrenrichtung für den Langmachmechanismus notwendig, um den gesamten Zug langzumachen. Durch die erforderliche Länge des Fahrweges (zulässige maximale Zuglänge zirka 750 m) und die Bodenbeschaffenheit ist davon auszugehen, dass hierbei größere technologische Herausforderungen bei der Umsetzung zu erwarten sind, weshalb für alle Aufgaben dieser Tätigkeit ein größerer Zeithorizont angenommen wurde.

4.3 GRUNDLEGENDE UND ABSCHÄTZENDE BERECHNUNGEN SOWIE ANNAHMEN

4.3.1 LANGMACHEN

Durch die Gewindesteigung von 7 mm und die benötigten 5 Umdrehungen (siehe Kapitel 3.2.2) ergibt sich eine Verlängerung um 35 mm , woraus durch die gegebenen Maße der Schraubenkupplung und der Trapezformel (4.1) ein Durchhang h von zirka 104 mm resultiert (vgl. Abbildung 1.2, 3.17, 3.18). Zur Gewährleistung einer ausreichenden Prozesssicherheit wird der zulässige Durchhang mit 125 mm festgelegt.

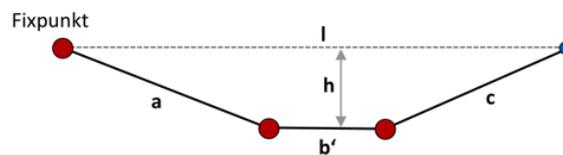


Abbildung 4.3: Ebenes Starrkörpermodell der Schraubenkupplung

a ...Kupplungsglasche b' ...Kupplungsspindel(Teilstück) c ...Kupplungsbügel

$$l = D_2 + \text{Kupplungsbügelradius} = 750\text{ mm} + 20\text{ mm} = 770\text{ mm} \quad a = 376\text{ mm}$$

$$c = 278,5\text{ mm} \quad b' = l - a - c + 35\text{ mm} = 150,5\text{ mm}$$

$$h = \frac{2}{l - b'} \cdot \sqrt{s(s + b' - l)(s - a)(s - c)} \approx 104\text{ mm} \quad \text{mit} \quad s = \frac{a + c + l - b'}{2} \quad (4.1)$$

Basierend auf den geometrischen Daten der Schraubenkupplung wäre es möglich, die notwendigen Kräfte für das Aufschrauben zu bestimmen. Allerdings stellt sich hierbei unter anderem die Frage nach dem gültigen Reibungskoeffizienten und der vorhandenen Vorspannkraft. Diese müssten für eine Vielzahl an Situationen (Vereisung, Rost, ...) eruiert werden. Alternativ kann man basierend auf der Prämisse, dass die Schraubenkupplung von Menschenhand aufschraubbar ist, die erforderlichen Kräfte gut abschätzen. Für die Berechnung erfolgt die Annahme, dass das Aufschrauben unter Einsatz des vollen Körpergewichts erfolgt.

Personengewicht (Annahme) : 75 kg

Maximaler Hebel bei kleinstem Kupplungsschwengel : $l_m = 0,28\text{ m}$

Griffbereich für die Handhabung : $l_g = 0,07\text{ m}$

Hebel für die Handhabung : $l_h = l_m - \frac{l_g}{2} = 0,28\text{ m} - \frac{0,07\text{ m}}{2} = 0,245\text{ m}$

$$M_{\text{aufschrauben}} = F_p \cdot l_h = 75\text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,245\text{ m} = 180,3\text{ Nm} \quad (4.2)$$

Im Fall von Vereisung oder Rost muss teilweise mittels Hammer et cetera nachgeholfen werden. Dies wird durch einen Aufschlag von 75 % berücksichtigt. Als notwendiges Drehmoment ergibt sich somit:

$$M_{erf.} = 316 \text{ Nm} \quad (4.3)$$

In Tabelle 4.3 ist die notwendige Öffnungskraft (Abbildung 4.4) für das Langmachen in Abhängigkeit vom Drehpunktabstand dargestellt. Grundsätzlich ist es hinsichtlich der aufzubringenden Kraft von Vorteil, einen möglichst großen Abstand zu erreichen.

Drehpunktabstand l_d	0,075 m	0,2 m	0,3 m	0,4 m	0,5 m
Kraft $F_{\ddot{o}}$ (ausgehend von $M_{erf.} = 316 \text{ Nm}$)	4213 N	1580 N	1053 N	790 N	632 N

Tabelle 4.3: Notwendige Öffnungskraft Langmachen

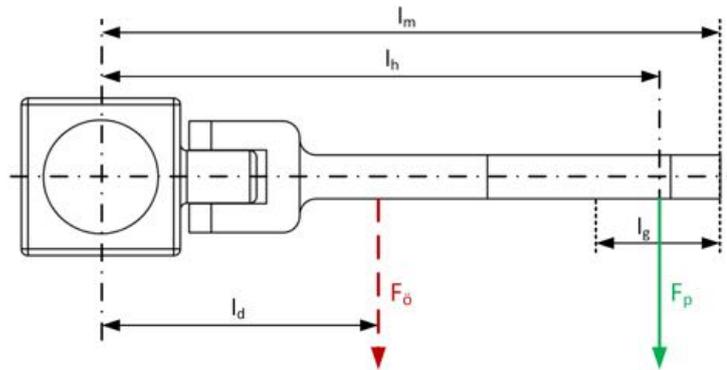


Abbildung 4.4: Öffnungskraft für das Langmachen (Kupplungsschwengelhalter / Kupplungsschwengel)

4.3.2 ENTKUPPELN

Im Folgenden werden mehrere Parameter fixiert und daraus resultierende Parameter für den grundlegenden Ablauf des Entkuppelns berechnet. In Absprache mit den ÖBB erfolgte die Festlegung, dass die maximale Fahrgeschwindigkeit von $2,5 \frac{m}{s}$ nur bei Güterwagen mit einer Länge von mindestens 12 m anzustreben ist. Kürzere Güterwagen können mit entsprechend niedrigeren Geschwindigkeiten entkuppelt werden (siehe Kapitel 4.5.5). Die Güterwagenlänge von 12 m dient als Basis der Berechnungen, ausgehend davon, dass an beiden Enden eines Güterwagens die Schraubekupplung zu entkuppeln ist. Der Bewegungsablauf des Entkuppelns ist als Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm in Abbildung 4.5 dargestellt.

$$\text{Maximale Zuggeschwindigkeit : } v_{max} = 2,5 \frac{m}{s}$$

$$\text{Minimale Wagenlänge : } x_w = 12 \text{ m}$$

Festgelegte maximale Beschleunigung : $a = 10 \frac{m}{s^2}$

Die Beschleunigung der Trennvorrichtung wurde so festgelegt, dass zum Einen ein performantes System entsteht ($t_{beschleunigung} = 0,25 s$) und zum Anderen Mechanik, Antriebe et cetera nicht zu stark belastet werden. Eine zu hohe Beschleunigung erfordert eine besonders robuste Bauweise sowie leistungsstarke Motoren größerer Bauform bei überschaubarem Zeitgewinn.

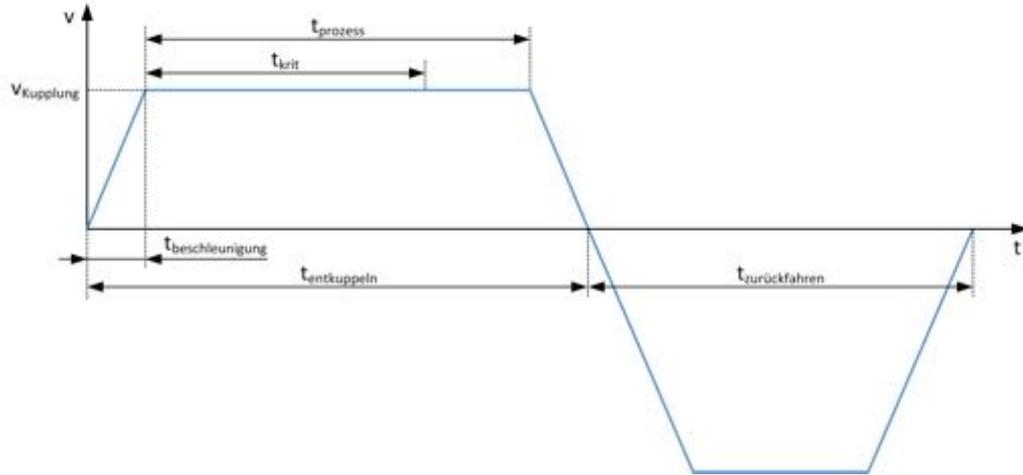


Abbildung 4.5: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des Entkuppelvorganges

Als erster Schritt erfolgt die Berechnung der zu Verfügung stehenden Zeit, bis der Güterwagen einen ortsfesten Punkt vollständig passiert:

$$t_{max} = \frac{x_w}{v_{max}} = \frac{12 m}{2,5 \frac{m}{s}} = 4,8 s$$

davon sollen 60 % für das Entkuppeln und 40 % für das Zurückfahren der Vorrichtung in die Ausgangsposition verwendet werden.

$$t_{entkuppeln} = 60 \% \cdot t_{max} = 0,6 \cdot 4,8 s = 2,88 s$$

$$t_{zurückfahren} = 40 \% \cdot t_{max} = 0,4 \cdot 4,8 s = 1,92 s$$

$$t_{beschleunigung} = \frac{v_{max}}{a} = \frac{2,5 \frac{m}{s}}{10 \frac{m}{s^2}} = 0,25 s$$

Daraus lässt sich die verfügbare Zeit für das Aushängen des Kupplungsbügels aus dem Zughaken berechnen:

$$t_{prozess} = t_{entkuppeln} - 2 \cdot t_{beschleunigung} = 2,88 s - 2 \cdot 0,25 s = 2,38 s$$

$$x_{\text{entkuppeln}} = v_{\text{max}} \cdot t_{\text{prozess}} + a \cdot t_{\text{beschleunigung}}^2$$

$$x_{\text{entkuppeln}} = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,38 \text{ s} + 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,25 \text{ s})^2 = 6,575 \text{ m} \quad (4.4)$$

Somit ergibt sich entsprechend (4.4) ein notwendiger Verfahrensweg von 6,6 m. Für eine ausreichende Reserve werden 10 m gewählt. Während sich die Güterwagen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit v_{max} fortbewegen und nach der Erkennung durch die Sensorik den Weg $x_{0,\text{Zug}}$ zurücklegen, muss eine Trennvorrichtung erst aus dem Stillstand auf die Geschwindigkeit v_{max} beschleunigen. Dabei legt die Trennvorrichtung den Weg $x_{0,\text{Trennv.}}$ zurück. Um zu gewährleisten, dass sich die Trennvorrichtung nach erfolgter Beschleunigung genau an der Position der Schraubenkupplung befindet, ist ein Versatz ($x_0 \geq 0,3125 \text{ m}$ (4.5)) zwischen der Mitte der Sensorik und der Mitte der Trennvorrichtung erforderlich (siehe Abbildung 4.6).

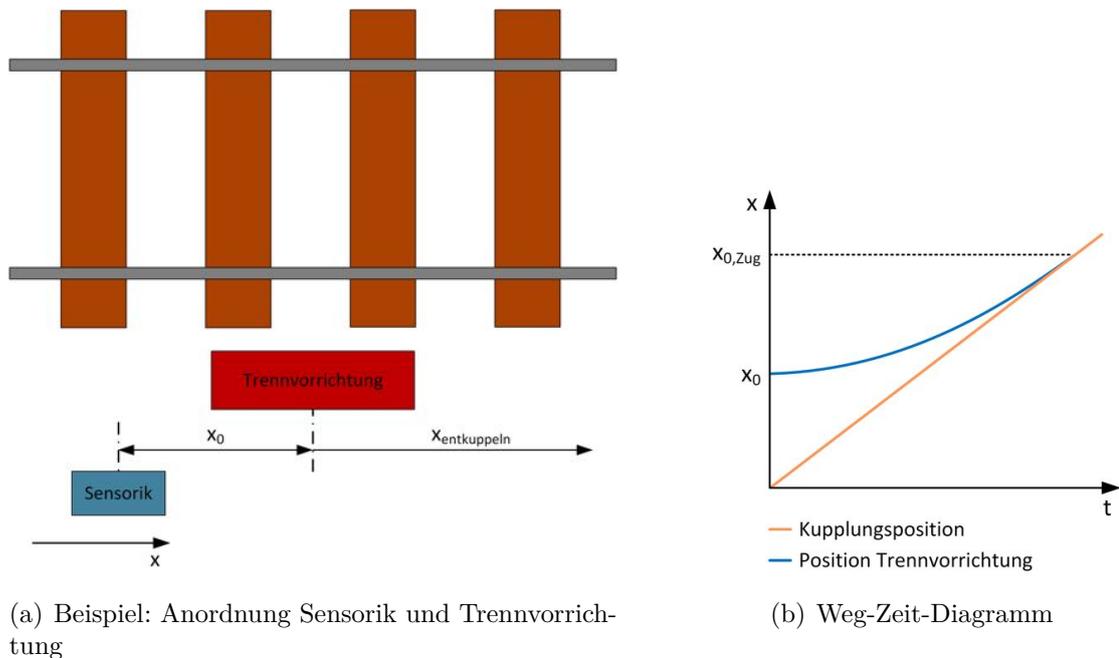


Abbildung 4.6: Weg-Zeit-Diagramm und Anordnung von Sensorik und Trennvorrichtung

$$x_0 = x_{0,\text{Zug}} - x_{0,\text{Trennv.}} = v_{\text{max}} \cdot t_{\text{beschleunigung}} - \frac{a \cdot t_{\text{beschleunigung}}^2}{2}$$

$$x_0 = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ s} - \frac{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,25 \text{ s})^2}{2} = 0,3125 \text{ m} \quad (4.5)$$

Die folgenden Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die Kupplungsposition nur zu Beginn gemessen und in weiterer Folge anhand der gemessenen Geschwindigkeit berechnet wird. Es wird nun angenommen, dass die kritische Phase $t_{krit.ges}$ nach ca. 70% von $t_{prozess}$ abgeschlossen ist. Die kritische Phase ist jene Zeitspanne innerhalb derer die Positionsgenauigkeit besonders wichtig ist, die erste Phase des Entkuppelns. Im Anschluss an das Aushängen des Kupplungsbügels findet ein Einfahren et cetera statt, wofür eine geringere Positionsgenauigkeit ausreichend ist.

Während des Entkuppelns soll eine Positionstoleranz Δx_{max} von zumindest $\pm 0,05 m$ akzeptabel sein. Die notwendige Genauigkeit für die Geschwindigkeit lässt sich anhand der Gegebenheiten und Annahmen zum Entkuppeln folgendermaßen abschätzen:

$$t_{krit} = 70 \% \cdot t_{prozess} = 0,7 \cdot 2,38 s = 1,66 s$$

$$t_{krit.ges} = t_{beschleunigung} + t_{krit} = 0,25 s + 1,66 s = 1,91 s$$

$$x_{krit.ges} = t_{krit.ges} \cdot v_{max} = 1,91 s \cdot 2,5 \frac{m}{s} = 4,775 m$$

$$v_{tol} = \frac{\pm \Delta x_{max}}{t_{krit.ges}} = \frac{\pm 0,05 m}{1,91 s} = \pm 0,026 \frac{m}{s} \quad (4.6)$$

Daraus folgt, dass die erforderliche Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung besser als $\pm 0,026 \frac{m}{s}$ sein muss. Sofern eine Positionsbestimmung über einen Teil der Strecke stattfindet, reduziert sich entsprechend die nötige Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung.

Im Fall von besonders niedrigen Geschwindigkeiten gilt die Annahme, dass die Position während des Entkupplungsvorganges fortlaufend bestimmt wird. Dies macht eine Messung von besonders niedrigen Geschwindigkeiten unnötig. Als Grenzwert werden hierfür $0,1 \frac{m}{s}$ veranschlagt. Aus dieser Geschwindigkeit resultiert durch $0,1 \frac{m}{s} \cdot t_{entkuppeln} = 0,1 \frac{m}{s} \cdot 2,88 s$ eine Strecke von $0,25 m$, entlang derer die Position der Schraubenkupplung zu bestimmen ist.

Um die Schraubenkupplung sicher aus dem Zughaken auszuhängen, erfolgt die Festlegung, dass der Kupplungsbügel, beziehungsweise die Schraubenkupplung um mindestens $\Delta h = 0,2 m$ anzuheben sind. Aus den Angaben der Eisenbahnbau- und Betriebsverordnung (EisBBV) und den Messungen am Verschiebebahnhof Linz ergibt sich eine maximale Ausgangshöhe von $1,155 m$ (Tabelle 3.1) und eine minimale Ausgangshöhe von etwa $0,94 m$ (Abbildung 3.5). Zuzüglich einer Toleranz und Δh ergibt sich somit eine zu erreichende Höhe über SOK von zumindest $1,4 m$. Die niedrigste mögliche Höhe der Schraubenkupplung ergibt sich aus der minimalen Ausgangshöhe minus dem Durchhang der Schraubenkupplung von $0,104 m$ (4.1).

Für den Prozessablauf ($t_{prozess}$) wird eine Aufteilung von 65 % für das Hochfahren und 35 % für das Runterfahren angenommen, da das Hochfahren mehr Zeit durch ein Abbremsen vor der Schraubenkupplung (siehe Abbildung 4.7 und 4.8) in Anspruch nimmt. Diese Maßnahme (Abbremsen vor der Schraubenkupplung) soll stoßartige Belastungen möglichst gering halten. Befindet sich die Schraubenkupplung höher als $0,84 m$, so steigert sich entsprechend die stoßartige Belastung. In der praktischen Umsetzung kann in diesem Bereich auch eine geringe konstante Geschwindigkeit über einen definierten Bereich (h_{min} bis $h_{v,konst.}$) vorgegeben werden (siehe Abbildung 4.8, alternativer Verlauf), um stoßartige Belastungen gleichmäßiger und niedrig zu halten. Aus den angegebenen Daten lässt sich die zu erwartende Kraft F_k für die Beschleunigung der Schraubenkupplung folgendermaßen berechnen:

$$m_{Kupplung} = 36 \text{ kg} \quad h_{max} = 1,4 \text{ m} \quad h_{min} = 0,94 \text{ m} - 0,104 \text{ m} \approx 0,84 \text{ m}$$

$$h_{diff} = h_{max} - h_{min} = 1,4 \text{ m} - 0,84 \text{ m} = 0,56 \text{ m}$$

$$t_{hochfahren} = 65 \% \cdot t_{prozess} = 0,65 \cdot 2,38 \text{ s} = 1,547 \text{ s}$$

$$t_{aushängen} = 40 \% \cdot t_{hochfahren} = 0,4 \cdot 1,547 \text{ s} = 0,62 \text{ s}$$

$$t_{Kupplungsbeschl} = \frac{t_{aushängen}}{2} = \frac{0,62 \text{ s}}{2} = 0,31 \text{ s}$$

$$a_{Kupplung} = \frac{h_{diff}}{t_{Kupplungsbeschl}^2} = \frac{0,56 \text{ m}}{(0,31 \text{ s})^2} = 5,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_k = m_{Kupplung} \cdot (a_{Kupplung} + g) = 36 \text{ kg} \cdot \left(5,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 562 \text{ N} \quad (4.7)$$

Die 562 N beziehen sich ausschließlich auf die Beschleunigung der Schraubenkupplung. Dabei ist die Eigenmasse der Mechanik, Reibung sowie ein möglicher Schlag bei Kontakt nicht berücksichtigt. Es erscheint technisch realisierbar, diese Kraft mit handelsüblichen Antrieben aufzubringen, ebenso wie die konstruktive Umsetzung einer geeigneten Mechanik.

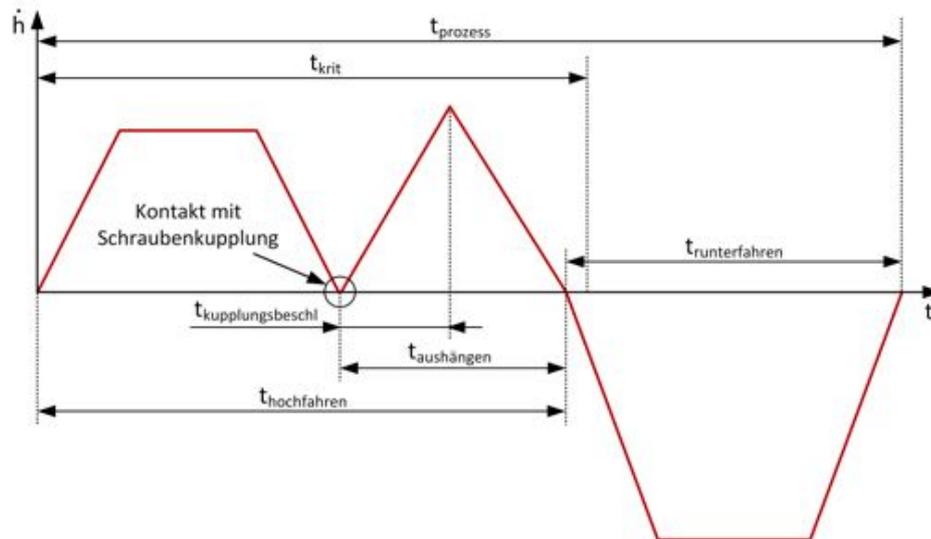


Abbildung 4.7: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des Teilschrittes: Aushängen der Schraubenkupplung

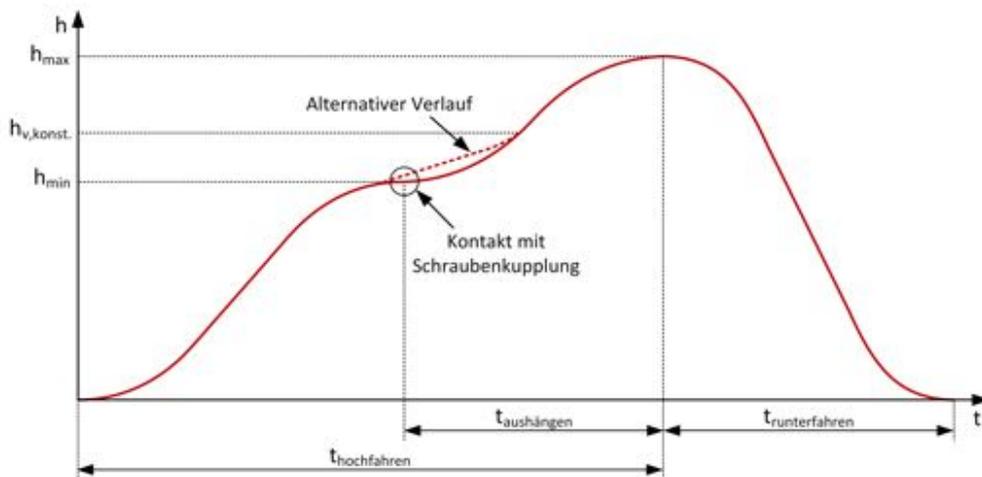


Abbildung 4.8: Weg-Zeit-Diagramm des Teilschrittes: Aushängen der Schraubenkupplung

4.4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN

4.4.1 LANGMACHEN

Eine Übersicht über den derzeitigen Personalbedarf und die Kosten basierend auf den Daten des Zentralverschiebebahnhofes Wien (Tabelle 1.1) für das Langmachen sind in Tabelle 4.4 aufgeschlüsselt.

Anzahl der Züge pro Tag	140
Aktuelle Zeitvorgabe pro Zug (Langmachen), Kapitel 4.5.4	40 min
Gesamtdauer für alle Züge	93,3 h
Notwendige Anzahl an Mitarbeitern (8 h Tagesarbeitszeit)	11,7
Jahreseinstiegsgehalt (Brutto) Verschieber [45]	25.869 €
Maximale einsatzabhängige Nebenbezüge pro Monat [45]	600 €
Durchschnittsgehalt Verschieber (Brutto, geschätzt: 120 %)	31.043 €
Lohnnebenkosten (86,7 %) [46]	26.914 €
Durchschnittliche Nebenbezüge eines Mitarbeiters pro Jahr (Annahme)	1800 €
Jahresgesamtkosten pro Mitarbeiter	59.757 €
Jahresgesamtkosten für 11,7 Mitarbeiter	699.157 €

Tabelle 4.4: Zeitdauer und Kosten der aktuellen Situation, Langmachen

Für die Überwachung, Wartung und Behebung von Störfällen der automatischen Trennvorrichtung sowie für Nebentätigkeiten wie zum Beispiel die Kontrolle der Güterwagen (Einhaltung der Begrenzungslinie, Ladungssicherung,...) ist ein gewisser Personalbedarf auch in Zukunft vorhanden. Es wird angenommen, dass permanent zwei Verschiebmitarbeiter anwesend sein müssen sowie in den Stoßzeiten verteilt zwei zusätzliche Mitarbeiter benötigt werden. Somit ergibt sich ein Bedarf von $2 \cdot \frac{24h}{8h} + 2 = 8$ Mitarbeitern pro Tag, woraus ein Einsparungspotential von 30 % (Anmerkung: $\frac{8}{11,7} = 0,68$) resultiert. Entsprechend den Daten aus Tabelle 4.4 ergäbe sich daraus eine Summe von etwa 210.000 € pro Jahr. Bei einer Amortisationsdauer von 3 bis 5 Jahren müssen die Investitionskosten somit unter 630.000 € bis 1.050.000 € liegen.

Um die zulässigen Kosten für eine Trennvorrichtung zum automatischen Langmachen abschätzen zu können, ist eine Definition der minimal notwendigen Anzahl an Vorrichtungen für die Abfertigung aller Züge auf allen Gleisen der Einfahrgruppe notwendig. Für diesen Zweck sind in Tabelle 4.5 prozessbestimmende Parameter eingetragen sowie in Tabelle 4.6 die geschätzte Zeitdauer der automatisierten Tätigkeiten und die resultierende Gesamtdauer.

Es wurde angenommen, dass keine permanente Energieversorgung der Trennvorrichtung durch Schleifkontakte et cetera stattfindet (Arbeitnehmerschutz), weswegen eine Zeitspanne für Betankung, Aufladung oder Batteriewechsel vorgesehen ist.

	Minima	Maxima	Mittel \varnothing
Verfahrgeschwindigkeit Trennvorrichtung	0,6 $\frac{m}{s}$	1,5 $\frac{m}{s}$	
Verfahrweg zwischen den Trennstellen			30 m
Anzahl der Trennstellen pro Zug (Kapitel 4.5.4)			9
Anfahrzeit pro Zug			60 s
Rückfahrzeit (resultiert aus Geschwindigkeit und zurückgelegtem Weg)	240 s	510 s	
Batteriewechsel / Ladung / Betankung / ... pro Zug	0,2	1	
Batteriewechselzeit / Ladezeit / Betankungszeit / ...	60 s	600 s	

Tabelle 4.5: Übersicht prozessbestimmende Parameter, automatisches Langmachen

Die eingetragenen Werte in Tabelle 4.6 basieren zum Teil auf Grundlage von Laborversuchen und Schätzungen des Zeitbedarfs der einzelnen Tätigkeiten. Im Fall, dass die Mechanik von der Seite (neben den Güterwagen) zur Trennstelle (zwischen den Güterwagen) eingebracht wird, ist vorläufig zur Kompensation des resultierenden Drehmomentes ein Ausfahren von Stützen oder ähnlichem angedacht. „Positionierung der Mechanik“ bedeutet die Einbringung der Mechanik von seitlich neben dem Zug, in den Berner-Raum zur Schraubenkupplung. Alle Zeiten sind als Minimal- und Maximalwerte aufgelistet. Aus diesen Werten resultiert eine wahrscheinliche Zeitdauer pro Zug von etwa 15 bis 41 Minuten. Die berechnete Zeitdauer liegt somit im Bereich der derzeit vorgegebenen Dauer von 40 Minuten (siehe Kapitel 4.5.4). Eine Abfertigung aller Züge durch zwei Trennvorrichtungen wäre aufgrund der Minimalwerte möglich, allerdings ist realistisch betrachtet davon auszugehen (Wartung, Störungen,...), dass zumindest drei Trennvorrichtungen notwendig sind. Unbetrachtet ist auch der bei drei eingesetzten Trennvorrichtungen notwendige Wechsel zwischen den Gleisabschnitten, um Züge auf allen Gleisen der Einfahrgruppe langmachen zu können. Dieser wäre sowohl mit einem Zeitaufwand als auch mit nicht unerheblichen Einbauten in der Infrastruktur verbunden.

Ausgehend von vier Trennvorrichtungen (siehe Tabelle 4.6, maximale Dauer pro Tag pro Einheit) ergeben sich aus dem Einsparungspotential maximal zulässige Stückkosten von 157.500 € bis 262.500 €. Damit vier Trennvorrichtungen alle Gleise der Einfahrgruppe bedienen können, ist ein Wechsel zwischen den Gleisen nötig. Dieser geht einher mit entsprechenden Sicherungsmaßnahmen und Überquerungsmöglichkeiten und verursacht nicht unerhebliche Kosten.

Um einen Gleiswechsel zu vermeiden und die notwendige Anzahl an Trennvorrichtungen gering zu halten, müssen demnach bei 15 Gleisen der Einfahrgruppe 8 Trennvorrichtungen eingesetzt werden. Die zulässigen Stückkosten wären 78.750 € bis 131.250 €. Letztlich gilt es die verschiedenen Situationen zu vergleichen, abzuwägen und eine Entscheidung zu treffen.

Tätigkeit	Dauer [s]	
	Minima	Maxima
Verfahren zwischen den Trennstellen (berechnet)	20	50
Erkennung / Betätigung Lösezug	4	8
Erkennung der Schraubenkupplung / Trennstelle	0,5	1
Ausfahren von Stützen et cetera	3	6
Positionierung der Mechanik	6	10
Öffnen der Bremsschläuche	3	7
Positionierung des Kupplungsschwengels	2	6
Aufschrauben der Schraubenkupplung	20	40
Einfahren der Mechanik	6	10
Einfahren von Stützen et cetera	3	6
Gesamtdauer pro Trennstelle [s]	67,5	144
Gesamtdauer pro Zug [min]	15,33	41,1
Gesamtdauer pro Tag [h]	35,76	95,9
Gesamtdauer pro Tag pro Einheit [h], bei vier Trennvorrichtungen	8,9	24

Tabelle 4.6: Geschätzte zeitliche Dauer der automatischen Abläufe

4.4.2 ENTKUPPELN

Das Entkuppeln stellt im Vergleich zum Langmachen einen wesentlich geringeren Aufwand dar. So gibt es hierbei keine Zeitvorgaben, sondern nur Fahrgeschwindigkeiten des Zuges als Vorgabe. Nachfolgend eine Auflistung über den geschätzten Personalbedarf und die Personalkosten für das Entkuppeln im derzeitigen Betrieb.

Anzahl an Entkupplungsstellen	1
Anzahl Vershubmitarbeiter für Betrieb	1
Notwendige Anzahl Mitarbeiter (8 h) bei 24 h Betrieb	3
Jahreskosten pro Mitarbeiter inklusive Nebenkosten	-60.000 €
Jahresgesamtkosten	180.000 €

Tabelle 4.7: Zeitdauer und Kosten der aktuellen Situation, Entkuppeln

Durch einen gewissen Personalbedarf am Verschiebebahnhof ist eine vollständige Einsparung aller Mitarbeiter unrealistisch. Auch ergeben sich durch die Automatisierung neue Tätigkeitsfelder sowie eine generelle Tätigkeitsveränderung. Aufgrund dessen erscheint ein Einsparungspotential von einem Mitarbeiter realistisch. Dies würde zu einer Kostensenkung von 60.000 € pro Jahr führen. Somit ergibt sich bei einer Amortisationsdauer von 3 bis 5 Jahren eine maximale Investitionssumme von 180.000 € bis 300.000 €.

4.5 ANFORDERUNGEN AN DIE AUTOMATISCHE TRENNVORRICHTUNG

Um den derzeitigen manuellen Betrieb nicht einzuschränken und eine mindestens gleichwertige Leistungsfähigkeit des zu entwickelnden Systems zu erhalten, sind folgende Punkte, die in Rücksprache mit Eisenbahngesellschaften (ÖBB,...) festgelegt wurden, einzuhalten.

4.5.1 ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN

Kupplungsarten

Es müssen alle auftretenden Arten von Schraubenkupplungen (entsprechend ÖNORM EN 15566:2011), siehe Kapitel 3.2, ohne Umrüstungen oder sonstige Adaptionen gehandhabt werden können. Dabei ist die Geometrie der Schraubenkupplung einheitlich, die Unterschiede liegen lediglich in den bereits erwähnten Kupplungsschwengelgeometrien. Ebenso sind alle auftretenden Positionen des Kupplungsschwengels zu berücksichtigen und dürfen zu keinen Störungen des Ablaufes führen.

Umbau von Güterwagen

Im Sinne der Wirtschaftlichkeit ist von Umbaumaßnahmen an den Güterwagen oder der Schraubenkupplung abzusehen. Aufgrund von notwendigen Veränderungen an den Güterwagen wäre es erforderlich alle Güterwagen die automatisch entkuppelt werden umzurüsten. Dies würde in der Praxis zu erheblichen Problemen führen, da es zu einer Abfertigung von Güterwagen verschiedenster Betreiber und Nationalitäten am Verschiebebahnhof kommt, die durch den erforderlichen Umbau nicht unmittelbar profitieren.

Bauweise

Es sind alle Normen, Vorschriften und Anweisungen, die für den Einbau und Betrieb am Verschiebebahnhof notwendig sind, zu berücksichtigen. Für österreichische Verschiebebahnhöfe sind dies im Besonderen:

- §19 des Eisenbahngesetz, EisBBV
- Allgemeinen Geschäftsbedingungen des ÖBB Konzerns für den Anlagenbau (AGB AB), Ausgabe 01.2007
- Eventuell Zulassung nach §40 Eisenbahngesetz (EisbG)
- Österreichische Bundesbahnen, DV V3, Betriebsvorschrift
- EisenbahnarbeitnehmerInnenschutzverordnung (EisbAV)
- Eisenbahnschutzvorschrift (EisbSV)
- ...

Witterungsbeständigkeit

Der geplante Einsatz der Trennvorrichtung am Verschiebebahnhof findet während des ganzen Jahres rund um die Uhr statt und erfordert ein hohes Maß an Witterungsbeständigkeit. Die Trennvorrichtung ist somit Regen, Schnee, Eis, Sand, Öl, Chemikalien et cetera ausgesetzt. Es gilt Maßnahmen zu treffen, die entweder die Trennvorrichtung zum Großteil vor Witterungseinflüssen schützen oder die Komponenten sind in einer Art und Weise auszuführen, die jeglichen Einflüssen einen hohen Widerstand bieten.

Sollbruchstellen

Die Ausführung der Trennvorrichtung muss so erfolgen, dass im Falle von Kollisionen oder ähnlichem der daraus entstehende materielle Schaden möglichst geringe Ausmaße aufweist. Hierfür sind im speziellen Sollbruchstellen an schnell austauschbaren und vor allem günstigen Bauteilen vorzusehen.

Sensorik

Verwendete Sensoren haben ein hohes Maß an Robustheit und langer Lebensdauer sowie hohe Witterungsfestigkeit aufzuweisen. Ebenso ist die Funktionalität zu überwachen und gegebenenfalls eine Warnung auszulösen.

Energie

Grundsätzlich sind hinsichtlich Energiebedarf keine Einschränkungen vorhanden, da im Eisenbahnbereich mit sehr hohen Leistungen (MW) gearbeitet wird und daher der Verbrauch für das automatische Trennen kein Problem darstellt. Deziert ausgeschlossen von Seiten der Eisenbahngesellschaften ist allerdings jegliche Verwendung und Aufbereitung von Druckluft, aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades, notwendiger Wartung et cetera.

4.5.2 ANFORDERUNGEN AN ARBEITNEHMERSCHUTZ UND SICHERHEIT

Arbeitnehmerschutz

Die Anlage muss allen Anforderungen des Arbeitnehmerschutzes, insbesondere der EisbAV, entsprechen. Dies ist durch entsprechende konstruktive Gestaltung, Lichtsignale, Beklebungen, Not-Aus et cetera sicherzustellen. Während des Betriebs darf es in keinsten Weise zu einer Gefährdung von Personen kommen. Einbauten sind so zu gestalten, dass sie keine Stolpergefahr darstellen oder ausreichend gekennzeichnet sind. Ein gefahrloses Betreten des Arbeitsbereiches muss durch geeignete Maßnahmen möglich sein.

Sicherheit

Jegliche Störung und Fehler dürfen zu keinem unsicheren Zustand der Anlage führen. Gleichermaßen sind diese dem Bediener unmittelbar anzuzeigen, beziehungsweise zu melden. Es muss sichergestellt werden, dass durch die Trennvorrichtung weder die Schraubenkupplung noch sonstige Wagenteile beschädigt werden oder der Zug entgleist.

4.5.3 ANFORDERUNGEN AN WARTUNG UND BETRIEB

Betrieb

Die Lebensdauer der voll entwickelten Trennvorrichtung soll aus technischer, mechanischer und funktioneller Sicht mindestens 15 Jahre betragen. Dieser Zeitrahmen gilt ebenfalls für die eingesetzte Software. Die Anlage ist entsprechend den Umgebungsbedingungen zu gestalten (-40 °C bis >65 °C). Es sind nur Materialien zu verwenden, die ohne Einschränkungen entsorgungsfähig und nach dem derzeitigen Abfallwirtschaftsgesetz als ungefährlich eingestuft sind.

Wartung

Wartungstätigkeiten sind so auszulegen, dass diese in den Pausen oder während des laufenden Betriebes durchgeführt werden können. Grundsätzlich soll eine Vorrichtung entstehen die ohne jegliche Wartungstätigkeiten auskommt.

4.5.4 ANFORDERUNGEN FÜR DAS LANGMACHEN

Geschwindigkeit

Grundsätzlich ist das Tätigkeitsfeld des Langmachens nicht zeitkritisch, woraus folgt, dass diesbezüglich keine konkreten Anforderungen an den Langmachmechanismus gestellt werden. Lediglich eine vergleichbare Zeitdauer, wie aktuell dem Personal vorgegeben, sollte erreicht werden. Entscheidend ist die Abschätzbarkeit der benötigten Zeit, um weiterführende Planungen am Verschiebebahnhof durchführen zu können. Die vorgegebene zulässige Bearbeitungsdauer pro Zug durch einen Vershubmitarbeiter liegt bei 40 Minuten. Die mittlere Anzahl an Trennstellen liegt in etwa bei 9 pro Zug (Angabe DB, ÖBB). Es wird angenommen, dass im Schnitt jede zweite Schraubenkupplung eine Trennstelle ist.

Einsatzort

Der Mechanismus zum Langmachen einer Schraubenkupplung muss einen kompletten stillstehenden Zug mit einer maximalen Länge von ungefähr 750 m (Angabe ÖBB, 740 m inklusive Triebfahrzeug [DB Ril 408.0711, zit. n. 10, S.14]) langmachen können. Dementsprechend befindet sich dessen Einsatzort in der Einfahrgruppe entlang der gesamten Zuglänge zwischen beziehungsweise neben den Gleisen. Typischerweise besteht eine Einfahrgruppe aus zirka 10 bis 17 Gleisen (Kapitel 1.2).

Trennstelle erkennen

Durch eine geeignete Sensorik müssen die einzelnen vorgegebenen Trennstellen laut Zerlegeliste eindeutig identifiziert werden. Zusätzlich ist eine Positionsermittlung der Schraubenkupplung essentiell, damit die weiteren Tätigkeiten (siehe Tabelle 4.6) vorbereitet und anschließend durchgeführt werden können.

Betätigen des Lösezuges

Zur Entlüftung des Bremssystems ist der Lösezug eines jeden Güterwagens zu betätigen (ziehen am Lösezug). Kann an einem Güterwagen der Lösezug nicht detektiert werden, so hat unmittelbar eine Fehlermeldung zu erfolgen.

Bremsschläuche öffnen

Hierzu soll der Bajonettverschluss der Bremsschläuche geöffnet werden, siehe Kapitel 3.2.3. Dies kann nur nach durchgeführter Entlüftung des Bremssystems erfolgen.

Aufschrauben der Schraubenkupplung

Durch Drehen des Kupplungsschwengels wird die Schraubenkupplung aufgeschraubt. Eine Fehlermeldung im Falle einer unzureichenden Lösung der Spindel muss stattfinden.

4.5.5 ANFORDERUNGEN FÜR DAS ENTKUPPELN

Geschwindigkeit

Im Gegensatz zum Langmachen spielt beim Entkuppeln die Zeitdauer des Vorganges eine entscheidende Rolle, sofern am fahrenden Zug entkuppelt wird, siehe hierzu Kapitel 4.3.2. Während des Entkupplungsvorganges ist eine Erhöhung der maximal zulässigen Geschwindigkeit des Zuges von derzeit $1,6 \frac{m}{s}$, auf mindestens $2 \frac{m}{s}$ und idealerweise auf $2,5 \frac{m}{s}$ vorzusehen. Der Entkupplungsmechanismus muss bei dieser Geschwindigkeit in der Lage sein, Güterwagen mit einer Länge von mindestens $12 m$, an beiden Enden zu entkuppeln (Güterwagen können eine Länge von über $22 m$ aufweisen [47]). Allerdings können Güterwagen auch kürzer als $9 m$ sein [47]. In diesen Fällen muss die Geschwindigkeit des Zuges entsprechend reduziert werden.

Die Geschwindigkeit der Güterwagen und somit die Geschwindigkeit der Schraubenkupplung ist entsprechend den Berechnungen in Kapitel 4.3.2 mit einer Genauigkeit von mindestens $0,026 \frac{m}{s}$ (Zuggeschwindigkeit: $2,5 \frac{m}{s}$, Güterwagenlänge: $12 m$) zu ermitteln.

Einsatzort

Der Einsatzort für den Entkupplungsmechanismus liegt entweder am Abrollberg, mit deutlichem Abstand zur Bergkuppe, sodass eine sichere Trennung der Güterwagen vollzogen werden kann oder in der Einfahrgruppe (siehe Kapitel 1.2). Ausschlaggebend für die genaue Position am Abrollberg bei einer Entkupplung an fahrenden Güterwagen ist die maximale Länge der jeweiligen Wagengruppen, um ein vorzeitiges Spannen der Schraubenkupplung zu vermeiden (vgl. Kapitel 1.2 und 3.1). Somit wäre eine möglichst große Entfernung zur Bergkuppe von Vorteil. Allerdings mit dem Nachteil, dass bei sehr kurzen Wagengruppen (einzelne Güterwagen) viele frühzeitig entkuppelt sind. Die frühzeitig entkuppelten Güterwagen können in weiterer Folge nicht mehr aktiv gebremst werden, was ein unnötiges Sicherheitsrisiko darstellt.

Die Entfernung zur Bergkuppe ist zusätzlich durch verbaute Weichen eingeschränkt, da in diesem Bereich der Einbau einer Vorrichtung unmöglich ist. Da die Einfahrgleise mittels Weichen zu einzelnen Gleisen gebündelt werden, ist der Einbau eines Entkupplungsmechanismus unbedingt zwischen den Weichen und der Bergkuppe erforderlich (möglichst geringe notwendige Stückzahl).

Es wurde festgelegt, dass Wagengruppen mit 6 Güterwagen entkuppelbar sein müssen. Bei gleich schweren und 22 m langen Güterwagen ergäbe sich daraus ein Mindestabstand von $3 \cdot 22\text{ m} = 66\text{ m}$ zur Bergkuppe. In der Praxis weisen Güterwagen in der Regel nicht das gleiche Gewicht auf (zum Beispiel 5 leere Wagen und ein besonders schwer beladener), wodurch der Abstand noch vergrößert werden muss. Damit diese Wagengruppen garantiert entkuppelt werden können wird der Minimalabstand zur Bergkuppe mit $6 \cdot 22\text{ m} = 132\text{ m}$ festgelegt.

Langgemachte Trennstelle erkennen

Wie bereits beim Langmachen ist auch beim Entkuppeln eine Erkennung und Positionsbestimmung der Schraubenkupplung notwendig. Zusätzlich muss noch sichergestellt sein, dass die zu entkuppelnden Schraubenkupplungen tatsächlich langgemacht sind.

Kupplungsbügel aushängen

Hierbei muss am fahrenden Zug der Kupplungsbügel aus dem Zughaken gehoben werden. Im Falle einer Störung oder wenn sich der Kupplungsbügel nicht aushängen lässt, muss unmittelbar ein Nothalt erfolgen. Ergänzend hat der Entkupplungsmechanismus im Störfall in einen sicheren Zustand überzugehen.

4.6 ANFORDERUNGSLISTE

Nachfolgend eine Zusammenfassung und Auflistung der vorangegangenen Anforderungen. Bei der Art der Anforderungen wird nach Forderung (F) / Wunsch (W) unterschieden.

Art	Anforderung	Soll	Ideal
Grundvoraussetzungen			
F	Keine Veränderungen an den Güterwagen		
F	Keine wesentlichen Veränderungen der Infrastruktur		
F	Keine Warneinrichtungen, die umliegende Einwohner beeinträchtigen		
F	Einsatz 24/7		
F	Einhaltung aller relevanten Normen und Vorschriften		
F	Handhabung aller Arten von Kupplungsschwengeln		

Geometrie			
W	Handhabung der Schraubenkupplung innerhalb des Berner-Raumes		
F	Zulässige Breite bei Zugriff überhalb der Puffer	<0,38 m	
F	Zulässige Breite bei Zugriff unterhalb der Puffer	<0,44 m	
F	Zulässige Bauhöhe innerhalb des Gleises	SOK (190 mm)	<SOK
F	Zulässige Bauhöhe außerhalb des Gleises	<3,45 m über SOK	
F	Einhaltung der Bedienungsräume und Sicherheitsabstände		
Energie			
F	Keine Verwendung von Druckluft		
Umgebungsbedingungen			
F	Temperaturbereich	-40 °C bis >65 °C	
F	Einsatz bei jeder Witterung, Tag und Nacht		
Sicherheit			
F	Einhaltung aller geltenden Sicherheitsabstände		
F	Anbringung von Not-Aus Schaltern		
F	Keine Stolpergefahren		
F	Möglichkeit zur gefahrlosen Betretung des Arbeitsbereiches		
F	Kein automatisches Aktivieren nach Störungen		
F	Fehler dürfen keine kritischen Zustände verursachen		
F	Meldung im Störfall		
Langmachen			
F	Aufschrauben aller relevanten Schraubenkupplungen am stehenden Zug, laut Trennliste		
F	Aufzubringendes Drehmoment zum Aufschrauben der Schraubenkupplung	>316 Nm	>360 Nm
F	Zu behandelnde maximale Zuglänge	750 m	
F	Einsatz in allen Gleisen der Einfahrgruppe	≥10 Gleise	≥17 Gleise
F	Öffnen der Bremsschläuche		
F	Anpassung an den Durchhang der Schraubenkupplung		
W	Betätigung des Lösezuges		
F	Abfertigungsdauer pro Zug	40 Minuten	<40 Minuten
F	Etwaige Fahrwege zwischen den Gleisen müssen für den Wagenmeister begehbar sein		
Entkuppeln			
F	Aushängen langgemachter Schraubenkupplungen an fahrenden Zügen		
F	Zuggeschwindigkeit	2 $\frac{m}{s}$	2,5 $\frac{m}{s}$
F	Güterwagenlänge bei voller Geschwindigkeit	≥12 m	≥8 m
F	Leistung (Vorgabe durch ÖBB)	4000 Wagen/Tag	
F	Maximaler Fahrweg	15 m	<10 m
F	Erreichbare Auswurfhöhe über SOK	1,4 m	>1,4 m
F	Mindestabstand zur Bergkuppe	132 m	>132 m
Sensorik			
F	Sensorüberwachung		
F	Robustheit gegenüber Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee, Nebel, ...		
F	Erkennung der Trennstelle		
F	Positionsbestimmung der Schraubenkupplung	≤ ±0,05 m	
W	Erkennung und Positionsbestimmung des Lösezuges		
F	Detektion der Geschwindigkeit	ab 0,1 $\frac{m}{s}$ bis ca. 4 $\frac{m}{s}$	
F	Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung	≤ ±0,026 $\frac{m}{s}$	
F	Erkennung ob die Schraubenkupplung korrekt langgemacht wurde		

Konstruktion und Fertigung			
W	Einfache Konstruktion mit wenigen Bauteilen und Bauteilen niedriger Komplexität		
F	Einbau von Sollbruchstellen		
F	Kostengünstige Elemente und leichter Austausch im Bereich der Sollbruchstellen		
W	Wartungsfreie Bauteile und Komponenten		
F	Sehr robuste und witterungsbeständige Bauweise		
F	Einsatz entsorgungsfähiger und ungefährlicher Materialien		
Wartung und Betrieb			
F	Automatischer Betrieb mit maximal einer Aufsichtsperson		
W	Autonomer Betrieb		
F	Manueller Betrieb jederzeit möglich		
F	Keine zusätzlichen Einschränkungen des Betriebes		
F	Einfache Verwendung, selbstständiger Ablauf		
F	Lebensdauer	15 Jahre	>15 Jahre
W	Wartung im laufenden Betrieb oder in Pausen		
Transport			
W	Einfacher Transport der Komponenten, ohne Sondertransport		
Termin			
F	Testbetrieb Demonstrator Entkuppeln	Q3 2018	
W	Funktionsfähiger Demonstrator Langmachen	Q1 2018	
Kosten			
W	Zielverkaufspreis der entwickelten Trennvorrichtung, zum Langmachen für die komplette Einfahrgruppe	<1.050.000 €	<630.000 €
W	Zielverkaufspreis der entwickelten Trennvorrichtung, zum Entkuppeln für die komplette Einfahrgruppe	<300.000 €	<180.000 €

Tabelle 4.8: Anforderungsliste für die automatische Trennvorrichtung

5 LÖSUNGSPRINZIPIEN FÜR DIE MECHANIK

Nach dem Klären und Präzisieren der Anforderungen (Kapitel 4) erfolgt das Konzipieren, welches die Arbeitsschritte 2 (Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen) und 3 (Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen) der VDI 2221 (siehe Abbildung 4.1) beinhaltet. Abbildung 5.1 bietet eine detaillierte Auflistung der einzelnen Arbeitsschritte des Konzipierens.

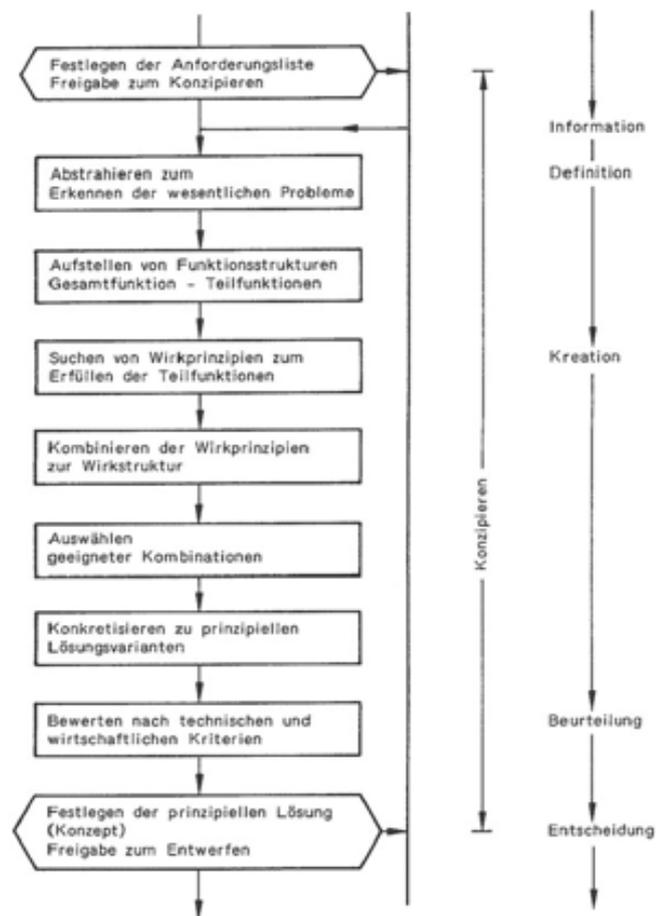


Abbildung 5.1: Arbeitsschritte beim Konzipieren [Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 7. Auflage, 2007 zit. n. 48, S.60]

Im ersten Schritt gilt es die wesentlichen Probleme der Aufgabenstellung zu erkennen und das Problem zum Beispiel durch abstrahieren der Anforderungsliste lösungsneutral zu formulieren. Diese lösungsneutrale Problemformulierung ist ein wichtiges Ergebnis für die weitere Lösungserarbeitung und kann als Zweck oder Hauptaufgabe (Gesamtfunktion) betrachtet werden. Die Gesamtfunktion ist der Ausgangspunkt für das Aufstellen der Funktionsstruktur und wird zweckmäßig weiter in Teilfunktionen untergliedert. Diese sind untereinander verbunden und erfüllen so gemeinsam die Gesamtfunktion. [vgl. 44, S.342ff]

Basierend auf der Funktionstruktur muss im Folgenden ein Wirkprinzip (Funktionsträger) für jede Teilfunktion gefunden werden. Hierfür bieten sich verschiedene Methoden wie Analogiebetrachtung, Analyse bekannter technischer Systeme, Modellversuche oder intuitiv betonte Methoden (Brainstorming,...) an. Üblicherweise lassen sich mehrere Wirkprinzipien für eine Teilfunktion finden. Diese Wirkprinzipien werden zu Wirkkonzepten (Wirkstrukturen) verknüpft. Hierbei entstehen verschiedene Kombinationen, die abschließend zu bewerten sind. [44, S.348ff]

Die Entwicklung einer prinzipiellen Lösung für das automatische Trennen erfolgte auf Basis der gezeigten Schritte in Abbildung 5.1.

5.1 METHODEN ZUR LÖSUNGSFINDUNG

Sowohl für die Mechanik als auch die Sensorik gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, um zu einer praktikablen Lösung zu gelangen. Folgende Methoden tragen zur Lösungsfindung entscheidend bei und werden nach Bedarf eingesetzt:

- Patentrecherche und Analyse
- Brainstorming
- Diskussion mit Experten
- Grundlegende und abschätzende Berechnungen
- Modellversuche

5.2 LÖSUNGSKONZEPTE LANGMACHEN

Zu Beginn wird die Gesamtfunktion (Langmachen) in mehrere zweckmäßige Teilfunktionen gegliedert, die durch einen entsprechenden Fluss miteinander verbunden sind (Funktionsstruktur, siehe Abbildung 5.2) und gemeinsam die Gesamtfunktion erfüllen.

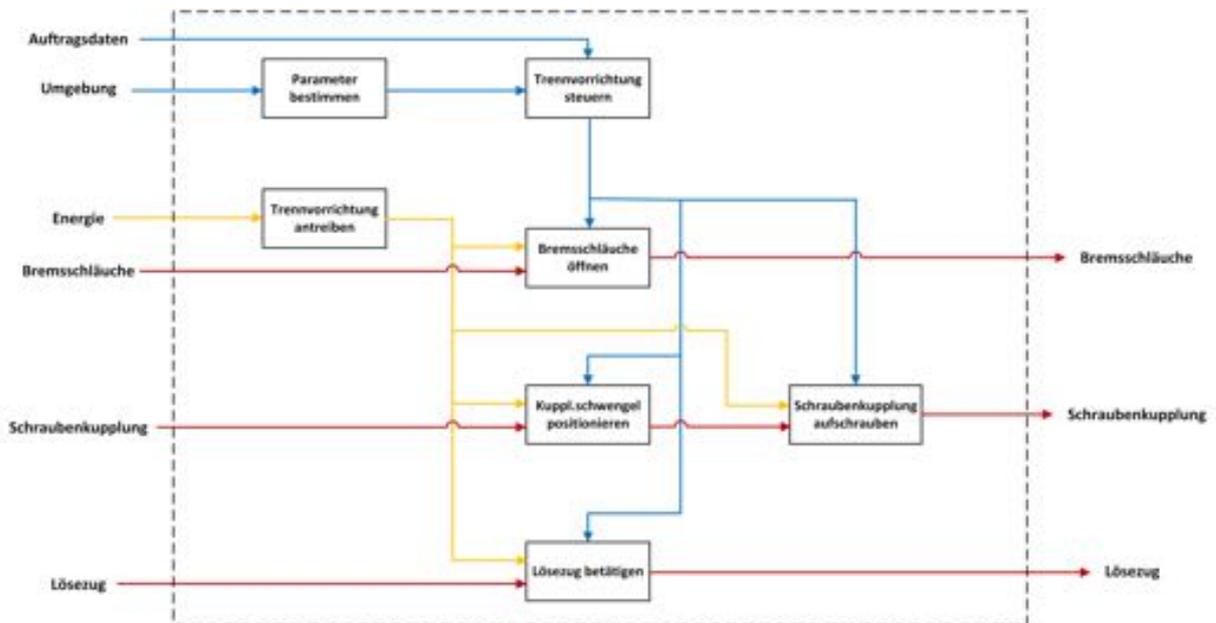


Abbildung 5.2: Funktionsstruktur Langmachen

Die folgenden Abschnitte zeigen mögliche Wirkprinzipien zur Lösung der Hauptaufgaben (Teilfunktionen) des Langmachens (Bremschläuche öffnen, Kupplungsschwengel positionieren, Schraubenkupplung aufschrauben), die in weiterer Folge zu Wirkstrukturen kombiniert werden. Aufgrund der niedrigeren Priorität wird in Absprache mit den ÖBB die Teilfunktion „Lösezug betätigen“ im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

5.2.1 WIRKPRINZIPIEN: TRENNVORRICHTUNG ANTREIBEN

Als Antriebe sind verschiedene Wirkprinzipien (Elektrisch, Pneumatisch, Hydraulisch) möglich.

5.2.2 WIRKPRINZIPIEN: BREMSSCHLÄUCHE ÖFFNEN

Abbildung 5.3 visualisiert potenzielle Wirkprinzipien die ein Öffnen der Bremschläuche ermöglichen.

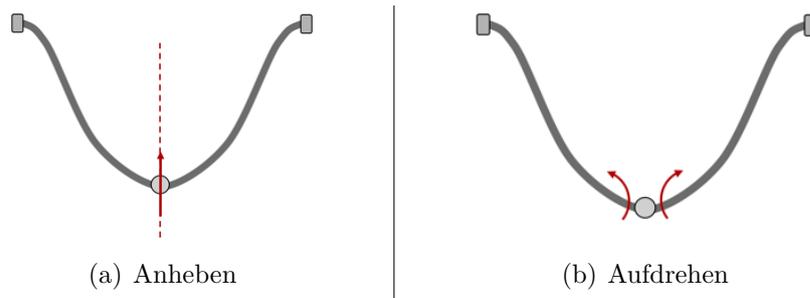


Abbildung 5.3: Wirkprinzipien zur Öffnung der Bremsschläuche

Anheben

Anheben am Bajonettverschluss, wodurch sich der Verschluss öffnet.

Aufdrehen

Aufdrehen des Bajonettverschlusses.

5.2.3 WIRKPRINZIPIEN: KUPPLUNGSSCHWENDEL POSITIONIEREN

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Positionierung des Kupplungsschwengels aufgezeigt. In Abbildung 5.4 ist hierfür der Kupplungsschwengel obenliegend dargestellt.

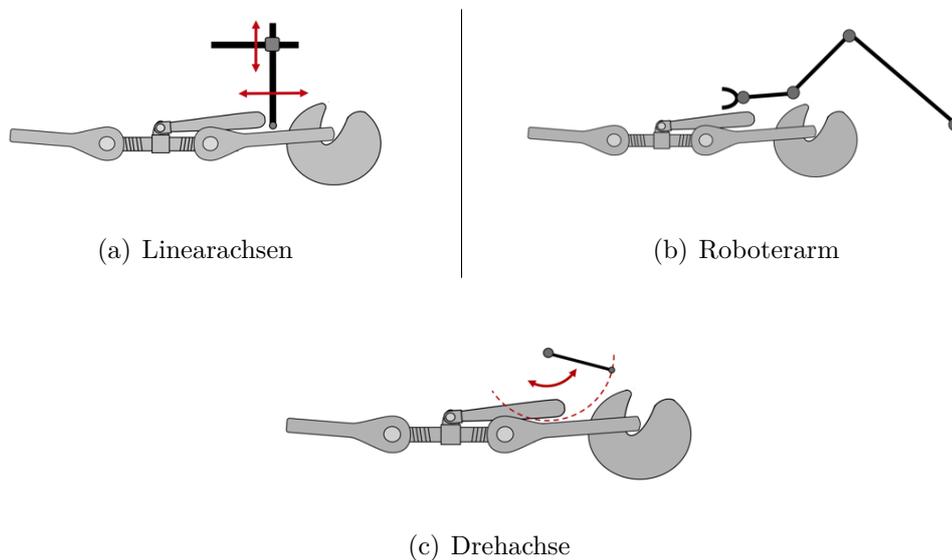


Abbildung 5.4: Wirkprinzipien für die Positionierung des Kupplungsschwengels

Linearachse

Linearachse mit zwei Freiheitsgraden, die unterhalb des Kupplungsschwengels einfädelt und ihn durch eine gesteuerte Bewegung aufrichtet.

Roboterarm

Ein Mehrachsroboterarm, der den Kupplungsschwengel greift, aufrichtet und die Schraubenkupplung aufschraubt. Zugriff seitlich, über oder unter den Puffern.

Drehachse

Eine Mechanik, die durch eine Drehbewegung unterhalb des Kupplungsschwengels einfädelt und ihn so aufrichtet.

5.2.4 WIRKPRINZIPIEN: SCHRAUBENKUPPLUNG AUFSCHRAUBEN

In Abbildung 5.5 sind Wirkprinzipien dargestellt, die ein Aufschrauben einer Schraubenkupplung ermöglichen. Als Angriffspunkt bietet sich entweder der Kupplungsschwengel oder die Kupplungsspindel an, wobei bei einem Aufdrehen direkt an der Kupplungsspindel erheblich größere Kräfte nötig sind, als am Kupplungsschwengel (Kapitel 4.3.1). Daher wird als Angriffspunkt der Kupplungsschwengel präferiert.

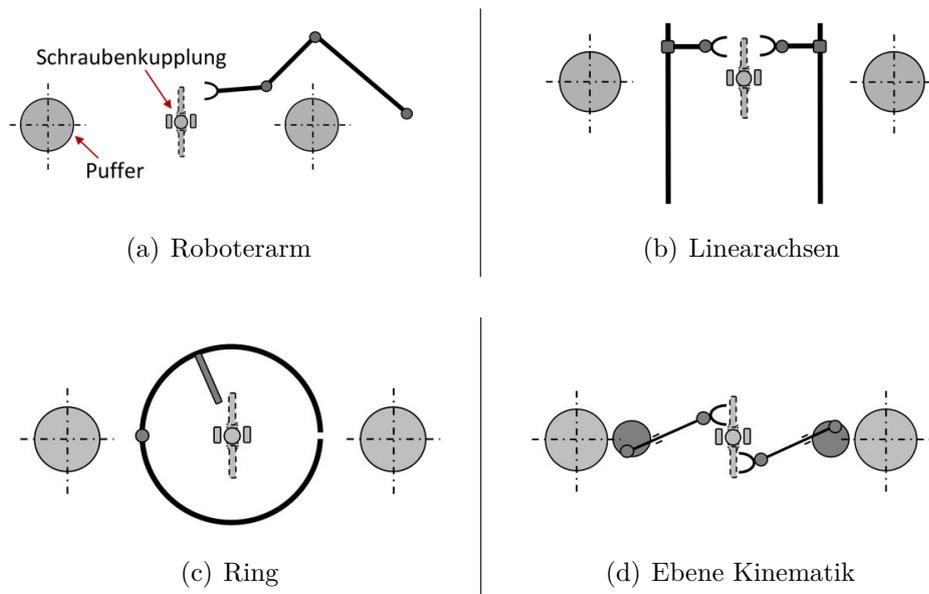


Abbildung 5.5: Wirkprinzipien für das Aufschrauben der Schraubenkupplung

Roboterarm

Mehrachsroboterarm, wie für die Positionierung des Kupplungsschwengels.

Linearachsen

Linearachsen mit zwei Freiheitsgraden und Greifer, die abwechselnd den Kupplungsschwengel fassen und aufschrauben. Die Achsen können entweder von unten aufgerichtet oder von oben eingebracht werden.

Ring

Ein Ring, der mit einem Mitnehmer den vorpositionierten Kupplungsschwengel in einer Drehbewegung mitnimmt und so die Schraubenkupplung aufschraubt. Der Ring ist in einer Art ausgeführt, dass er über die Schraubenkupplung gestülpt werden kann (zum Beispiel: zwei Hälften die aufklappbar sind).

Ebene Kinematik

Ebene Kinematik, mit der der Greifer eine kreisförmige Bewegung ausführen kann. Für eine komplette Umdrehung der Kupplungsspindel sind zwei Mechanismen einzusetzen, die jeweils eine halbe Umdrehung ausführen.

5.2.5 WIRKSTRUKTUREN: LANGMACHEN

Durch Verknüpfen der einzelnen Wirkprinzipien entstehen verschiedene Gesamtlösungen (Wirkstrukturen) für das Langmachen, visualisiert in Tabelle 5.6. Eine Verknüpfung soll nur mit verträglichen Wirkprinzipien erfolgen. Die entstandenen Wirkstrukturen werden in weiterer Folge, anhand einer Auswahlliste (Kapitel 5.2.6), bewertet und aussortiert. Als Überblick sind in den folgenden Tabellen 5.1 bis 5.5 die verschiedenen Wirkprinzipien für das Langmachen, die jeweilige Anzahl an Freiheitsgraden (FG) sowie die Vor- und Nachteile eingetragen. Die Bewertung in der letzten Spalte gibt an, ob die jeweiligen Prinzipien noch weiter verfolgt werden sollen.

Trennvorrichtung antreiben			
	Vorteile	Nachteile	Bewertung
Elektrisch	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamisch • Kompakt • Wartungsarm • Überlastfähig 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei kompakter Bauweise niedrige Drehmomente / Kräfte 	+
Pneumatisch	<ul style="list-style-type: none"> • Kompakte Antriebe 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung • Aufbereitung der Luft • Schlechter Wirkungsgrad • Leckage • Niedrige Drehmomente / Kräfte • Platzbedarf der Aufbereitung 	-
Hydraulisch	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kräfte • Sehr kompakte Antriebe 	<ul style="list-style-type: none"> • Wartung • Leckage • Platzbedarf der Aufbereitung • Geringe Dynamik 	±

Tabelle 5.1: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Trennvorrichtung antreiben

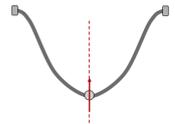
Bremsschläuche öffnen				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> • Einfacher Bewegungsablauf • keine aktiven Bauteile 		1	+
	<ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässige Öffnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexer Ablauf • aktive Bauteile 	2	±

Tabelle 5.2: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Bremsschläuche öffnen

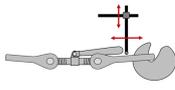
Kupplungsschwengel positionieren				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexer Ablauf 	2	+
	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flexibilität • Öffnen der Bremsschläuche • Positionierung des Kupplungsschwengels • Aufschrauben der Schraubenkupplung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten • Hoher Aufwand der Positionierung / Detektion 	≥4	±
	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Drehbewegung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorpositionierung notwendig 	1	+

Tabelle 5.3: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Kupplungsschwengel positionieren

Schraubenkupplung aufschrauben				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flexibilität • Öffnen der Bremsschläuche • Positionierung des Kupplungsschwengels • Aufschrauben der Schraubenkupplung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten • Hoher Aufwand der Positionierung und Detektion • Übertragbare Kräfte 	≥4	±
	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität • Öffnen der Bremsschläuche • Positionierung des Kupplungsschwengels • Aufschrauben der Schraubenkupplung 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ hoher Aufwand der Positionierung und Detektion 	6	+
	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Konstruktion • Geringer Steuerungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Aufrichten des Kupplungsschwengels • Kein Öffnen der Bremsschläuche • Verbindung der Ringhälften 	1	+

Tabelle 5.4: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung aufschrauben (Teil 1)

Schraubekupplung aufschrauben				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> Geringer Steuerungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> Platzbedarf Kein Aufrichten des Kupplungsschwengels Kein Öffnen der Bremsschläuche 	2	—

Tabelle 5.5: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubekupplung aufschrauben (Teil 2)

Verschiedene Lösungskonzepte für das Langmachen (LkL), zur Verknüpfung der einzelnen Wirkprinzipien, sind in Tabelle 5.6 visualisiert und in Tabelle 5.7 aufgelistet. Einzelne Wirkprinzipien deren Realisierung zu komplex, zu aufwendig oder mit der Anforderungsliste nicht vereinbar sind, wurden bereits gestrichen.

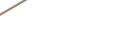
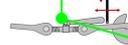
Lösungen	1	2	3	4
Trennvorrichtung antreiben				
Bremsschläuche öffnen				
Kupplungsschw. positionieren				
Schraubekupplung aufschrauben				
	LkL1	LkL2	LkL3	LkL4

Tabelle 5.6: Morphologischer Kasten Langmachen

Lösungskonzepte Langmachen (LkL)	
Bezeichnung	Kombination
LkL1	Elektrisch - Anheben - Drehachse - Ring
LkL2	Elektrisch - Anheben - Linearachse - Ring
LkL3	Elektrisch - Anheben - Roboterarm - Linearachsen
LkL4	Elektrisch - Aufdrehen - Roboterarm - Roboterarm
LkL5	Elektrisch - Anheben - Roboterarm - Roboterarm
LkL6	Hydraulisch - Aufdrehen - Drehachse - Ring

Tabelle 5.7: Auflistung der Lösungskonzepte (Wirkstrukturen) für das Langmachen

5.3 LÖSUNGSKONZEPTE ENTKUPPELN

Wie in Kapitel 5.2 erfolgt zu Beginn eine zweckmäßige Gliederung der Gesamtfunktion (Entkuppeln) in mehrere Teilfunktionen, die durch einen entsprechenden Fluss miteinander verbunden sind (Funktionsstruktur, siehe Abbildung 5.7) und gemeinsam die Gesamtfunktion erfüllen.

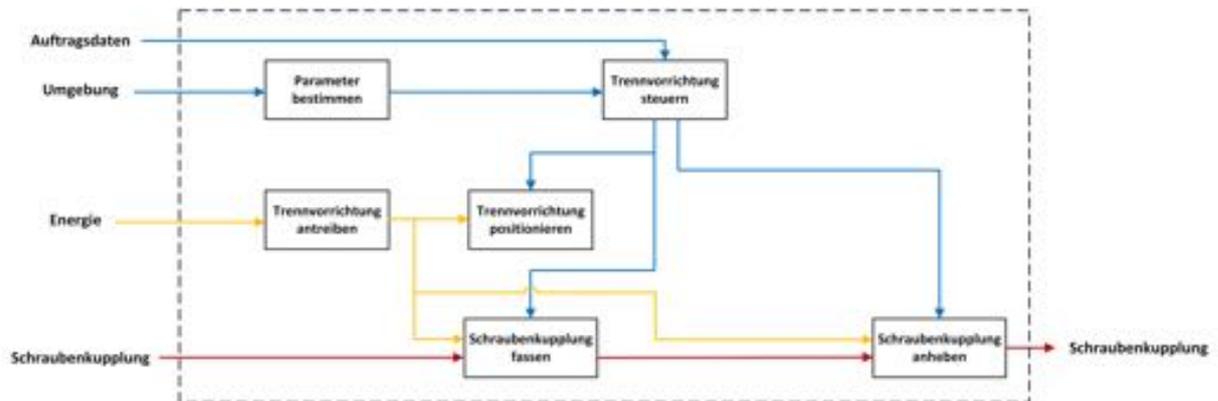


Abbildung 5.7: Funktionsstruktur Entkuppeln

In den folgenden Abschnitten sind mögliche Wirkprinzipien zur Lösung der Hauptaufgaben des Entkuppelns (Trennvorrichtung positionieren, Schraubenkupplung fassen, Schraubenkupplung anheben) aufgezeigt. Diese werden in weiterer Folge wieder zu verschiedenen Wirkstrukturen kombiniert und bewertet. Die Vorgangsweise erfolgt auf Basis der VDI 2221.

5.3.1 WIRKPRINZIPIEN: TRENNVORRICHTUNG ANTREIBEN

Siehe Kapitel 5.2.

5.3.2 WIRKPRINZIPIEN: TRENNVORRICHTUNG POSITIONIEREN

Durch ein Entkuppeln am fahrenden Zug muss die Trennvorrichtung auf die Zuggeschwindigkeit beschleunigt, zur Schraubenkupplung positioniert, abgebremst und zurückgefahren werden. Diese Positionierung kann nach unterschiedlichen Wirkprinzipien (Zahnstange, Zahnriemen, Seil, Kette, Spindel) stattfinden.

5.3.3 WIRKPRINZIPIEN: SCHRAUBENKUPPLUNG FASSEN

Um die Schraubenkupplung zu fassen, bieten sich verschiedene Ansätze an, welche nachfolgend visualisiert sind.

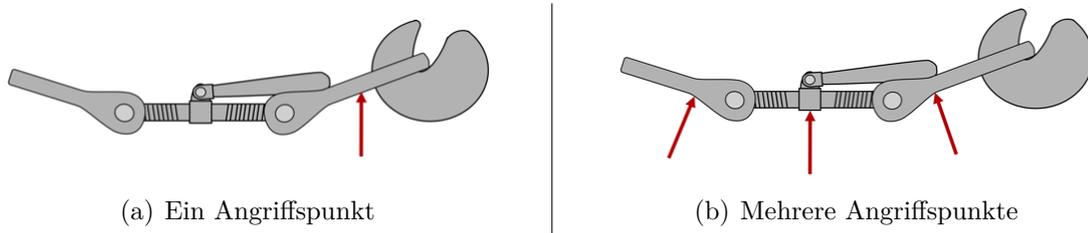


Abbildung 5.8: Wirkprinzipien für das Fassen der Schraubenkupplung

Ein Angriffspunkt

Derzeit von Verschubmitarbeitern am Abrollberg eingesetzt (Abbildung 1.7). Als einziger Angriffspunkt dient der Kupplungsbügel, knapp vor dem Zughaken.

Mehrere Angriffspunkte

Verwendet mehrere Angriffspunkte an der Schraubenkupplung, wie Kupplungsbügel, Kupplungslasche und Kupplungsspinde.

5.3.4 WIRKPRINZIPIEN: SCHRAUBENKUPPLUNG ANHEBEN

Um die Schraubenkupplung anzuheben, sind die in Abbildung 5.9 dargestellten Ansätze denkbar.

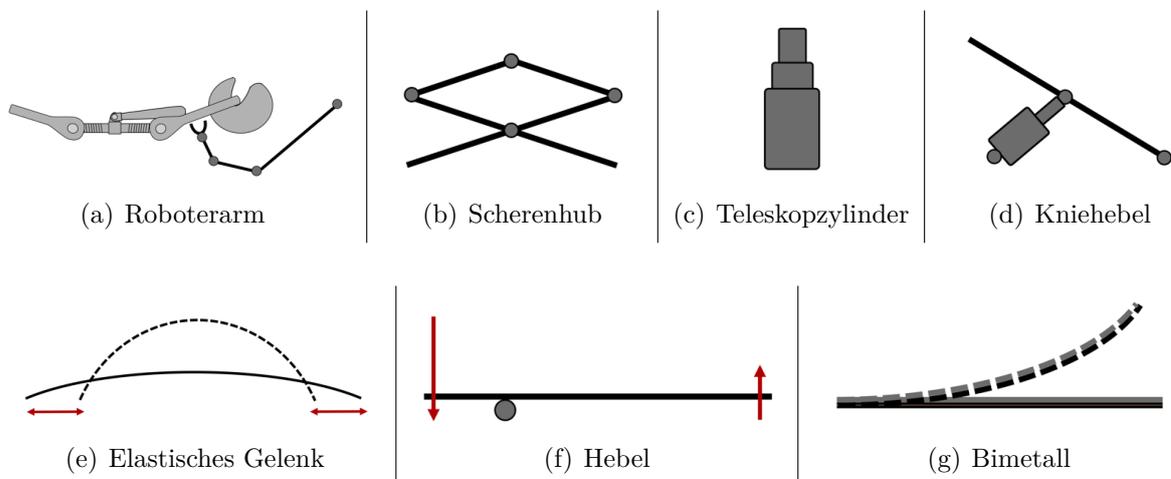


Abbildung 5.9: Wirkprinzipien für das Anheben der Schraubenkupplung

5.3.5 WIRKSTRUKTUREN: ENTKUPPELN

Ein Überblick über die verschiedenen Wirkprinzipien für das Entkuppeln sind in den Tabellen 5.8 bis 5.11 zusammengefasst. Zu den Prinzipien werden jeweils Vorteile und Nachteile beschrieben, die Anzahl an Freiheitsgraden (FG) sowie eine Bewertung angeführt. Im weiteren Verlauf werden keine negativ bewerteten Prinzipien mehr berücksichtigt.

Trennvorrichtung positionieren			
	Vorteile	Nachteile	Bewertung
Zahnstange	<ul style="list-style-type: none"> • Formschluss • Kostengünstig • Große Weglänge • Hohe Dynamik • Robust 	<ul style="list-style-type: none"> • Motor muss mitbewegt werden • Kabelführung 	±
Zahnriemen	<ul style="list-style-type: none"> • Formschluss • Hohe Dynamik 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Weglänge • Empfindlich gegenüber Umweltbedingungen 	±
Seil	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr robust • Große Weglänge • Hohe Dynamik 	<ul style="list-style-type: none"> • Reibschluss • Bewegte Masse 	+
Kette	<ul style="list-style-type: none"> • Formschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewegte Masse • Geringe Dynamik 	±
Spindel	<ul style="list-style-type: none"> • Formschluss • Hohe Positionsgenauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Dynamik • Geringe Weglänge 	-

Tabelle 5.8: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Trennvorrichtung positionieren

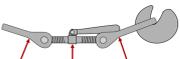
Schraubenkupplung fassen			
	Vorteile	Nachteile	Bewertung
	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfach • Prinzip wird aktuell verwendet 	<ul style="list-style-type: none"> • Genaue Positionierung erforderlich • Erkennung der verwendeten Schraubenkupplung notwendig (vorne oder hinten) • Erhöhter Kraftaufwand 	±
	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach • Robuste Positionierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verhalten der Schraubenkupplung unklar 	+

Tabelle 5.9: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung fassen

Schraubenkupplung anheben				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Flexibilität • Anheben und Fassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragbare Kräfte • Hohe Kosten • Hoher Aufwand der Positionierung und Detektion 	≥ 4	-

Tabelle 5.10: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung anheben (Teil 1)

Schraubenkupplung anheben				
	Vorteile	Nachteile	FG	Bew.
	<ul style="list-style-type: none"> Flache Bauweise 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Kräfte erforderlich (winkelabhängig) 	1	+
	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Kräfte übertragbar Robust 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Bauweise niedrige Geschwindigkeit 	1	±
	<ul style="list-style-type: none"> Flache Bauweise 	<ul style="list-style-type: none"> Niedrige Geschwindigkeit Hohe Kräfte erforderlich (winkelabhängig) 	1	±
	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Geschwindigkeit möglich Geringer Verschleis 	<ul style="list-style-type: none"> Dauerfestigkeit Übertragbare Kräfte 	1	-
	<ul style="list-style-type: none"> Einfach 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Kräfte oder hohes Bauvolumen notwendig 	1	-
	<ul style="list-style-type: none"> Kein Antrieb 	<ul style="list-style-type: none"> Langsam Übertragbare Kräfte 	1	-

Tabelle 5.11: Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung anheben (Teil 2)

Wie bei den Wirkstrukturen für das Langmachen ist in Tabelle 5.12 der morphologische Kasten mit unterschiedlichen Lösungskonzepten für das Entkuppeln (LkE) visualisiert. Untaugliche Wirkprinzipien wurden bereits gestrichen.

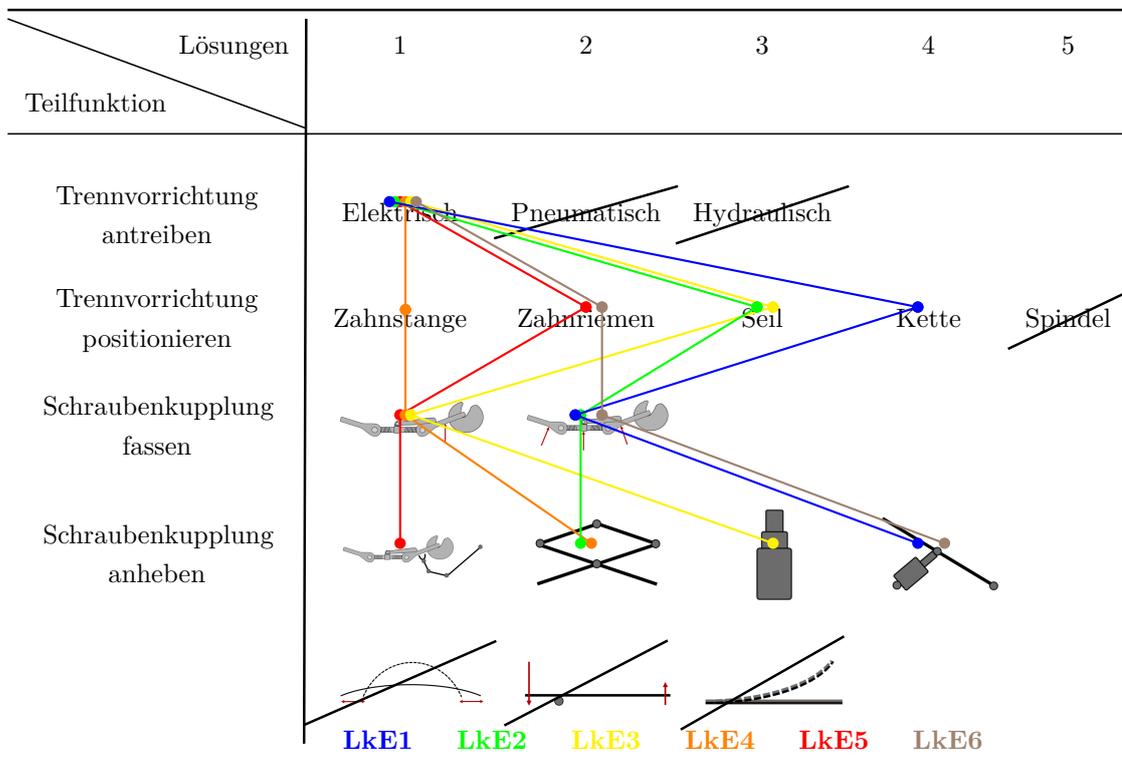


Tabelle 5.12: Morphologischer Kasten Entkuppeln

5.4 DETAILLIERUNG DER LÖSUNGSKONZEPTE FÜR DAS LANGMACHEN

Im Folgenden sind die Weiterentwicklungen und Detaillierungen der ausgewählten Lösungskonzepte für das Langmachen, aus Abbildung 5.6, beschrieben.

5.4.1 LANGMACHEN: LÖSUNGSKONZEPT 1 (LKL1)

Ein Schwachpunkt dieses Lösungskonzeptes (Anheben - Drehachse - Ring, siehe Tabelle 5.7) ist das Zusammenklappen und Verbinden der Ringhälften für das Aufschrauben der Schraubenkupplung. Zur Beseitigung wird nun der Einsatz einer einzelnen Ringhälfte betrachtet. Die Verwendung von nur einer Ringhälfte erfordert allerdings eine hohe Anzahl an Stütz- und Antriebspunkten (Variante 1, Abbildung 5.11), um die Ringhälfte sicher zu führen. So muss die Ringhälfte bei Variante 1 immer zwischen mindestens zwei Lagerpunkten (mit je zwei Stützpunkten) liegen. Der Winkel zwischen den Lagerpunkten (α_l) hängt somit direkt vom Öffnungswinkel α_r ab und beträgt in diesem Fall maximal 90° (5.1). Konkret beträgt in Variante 1 $\alpha_l = 60^\circ$. Die Anzahl der Stützpunkte kann durch ein Verkleinern des Öffnungswinkels ($\alpha_r < 180^\circ$) reduziert werden (Variante 2). Die minimale Öffnungsbreite b_r , um keinesfalls mit dem Kupplungsschwengel ($265\text{ mm} + 55\text{ mm} = 320\text{ mm}$, siehe Abbildung 3.13 und 3.18) zu kollidieren, beträgt $2 \cdot 320\text{ mm} = 640\text{ mm}$. Aus diesen Vorgaben folgt $d_{Ring} > 640\text{ mm}$. Als maximal zulässiger Durchmesser wird der Bereich des Berner-Raumes angenommen. Dieser beträgt inklusive des Kupplungsbereiches ungefähr $2 \cdot 400\text{ mm} + 183\text{ mm} = 983\text{ mm}$ (Abbildung 3.5 und 3.16). Von dieser Breite ist noch eine Positioniertoleranz von 50 mm abzuziehen. Somit ergibt sich ein zulässiger maximaler Ringdurchmesser $d_{Ring} = 933\text{ mm} \Rightarrow d_{Ring\text{ gewählt}} = 900\text{ mm}$. Daraus folgt eine notwendige aufzubringende Antriebskraft von 702 N (5.2) und ein Öffnungswinkel von mindestens $90,65^\circ$ (5.3). Abbildung 5.11 beinhaltet die Visualisierung von Variante 2, inklusive Stützpunkte (blau) und Antriebspunkte (rot).

$$\alpha_l = \frac{360^\circ - \alpha_r}{2} = \frac{360^\circ - 180^\circ}{2} = 90^\circ \quad (5.1)$$

$$F_a = \frac{M_{erf.}}{\frac{d_{Ring\text{ gewählt}}}{2}} = \frac{316\text{ Nm}}{0,45\text{ m}} = 702\text{ N} \quad (5.2)$$

$$\alpha_{rmin} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b_r}{d_{Ring\text{ gew.}}}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{640\text{ mm}}{900\text{ mm}}\right) = 90,65^\circ \quad (5.3)$$

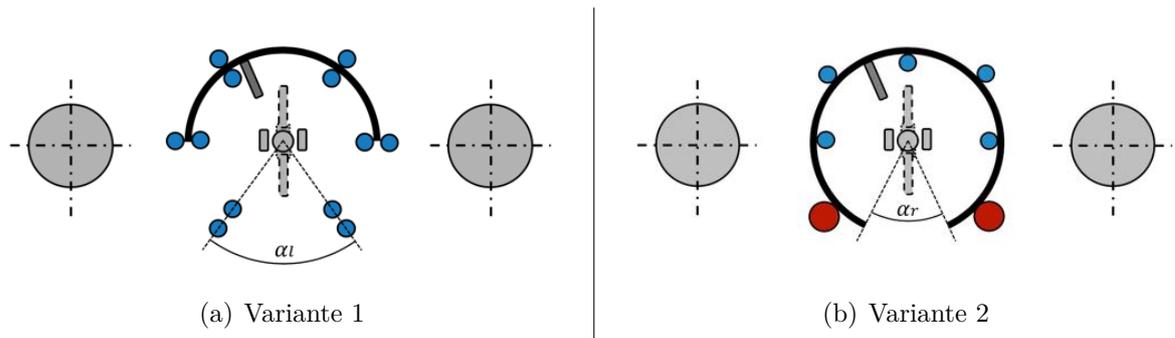


Abbildung 5.11: Erweiterung des Wirkprinzips, Schraubenkupplung aufschrauben

Als Tragkonstruktion dient eine u-förmige Halterung, an der die einzelnen Komponenten angeordnet sind (siehe Abbildung 5.12). Die gesamte Vorrichtung muss durch ihren Aufbau von oben über die Schraubenkupplung gestülpt werden. Im Gegensatz zu einem Zugriff von unten stellen so die geschlossenen Bremsschläuche kein Hindernis dar und der Kupplungsschwengel kann einfach von oben manipuliert werden. Zu den Komponenten zählen ein offener Ring (1) für das Aufschrauben der Schraubenkupplung, Klappen (2) für das Öffnen der Bremsschläuche sowie ein drehbar gelagertes Gestänge (3) um den Kupplungsschwengel zu positionieren (aufzurichten).

Die einzelnen Klappen sind drehbar gelagert und mit Anschlägen versehen. Durch die Schwerkraft fallen sie selbstständig nach unten in die horizontale Lage. Das Gestänge ist so ausgeführt, dass der Kupplungsschwengel sowohl obenliegend als auch seitlich im Sicherungshaken aufgerichtet werden kann. Verfügt die Klappe in der Mitte der Vorrichtung statt eines mechanischen Anchlages über eine Gasdruckfeder (4) oder ähnliches, so ist es einerseits möglich die diagonalen Bremsschläuche zu öffnen und andererseits kann die Klappe durch das hohe Gewicht der Schraubenkupplung nach unten weggedrückt werden. Auf diese Weise lässt sich ein Verhängen der Klappe unter der Schraubenkupplung vermeiden. Eine Führung des Rings sowie ein Antriebskonzept sind nur schematisch eingezeichnet.

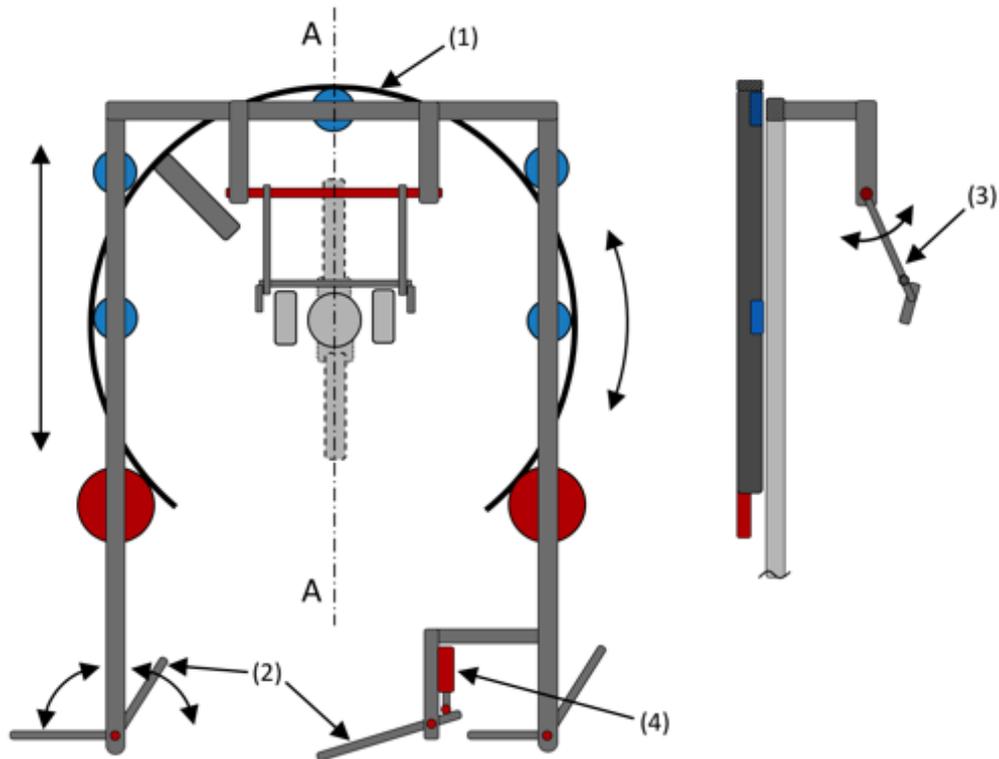


Abbildung 5.12: Lösungskonzept 1, Langmachten

(1)...Ring (2)...Klappen (3)...Gestänge (4)...Gasdruckfeder

5.4.2 LANGMACHEN: LÖSUNGSKONZEPT 2 (LkL2)

Dieses Lösungskonzept (Anheben - Linearachse - Ring, siehe Tabelle 5.7) ist größtenteils mit Konzept 1 identisch, lediglich die Positionierung des Kupplungsschwengels erfolgt durch einen auf einer Linearachse (1) (alternativ: Teleskop) montierten Teleskopzylinder (2). Der elektrische Teleskopzylinder ist mit passenden Anbauteilen (3) ausgestattet, um den obenliegenden und seitlichen Kupplungsschwengel zu erfassen (dargestellt in Abbildung 5.13).

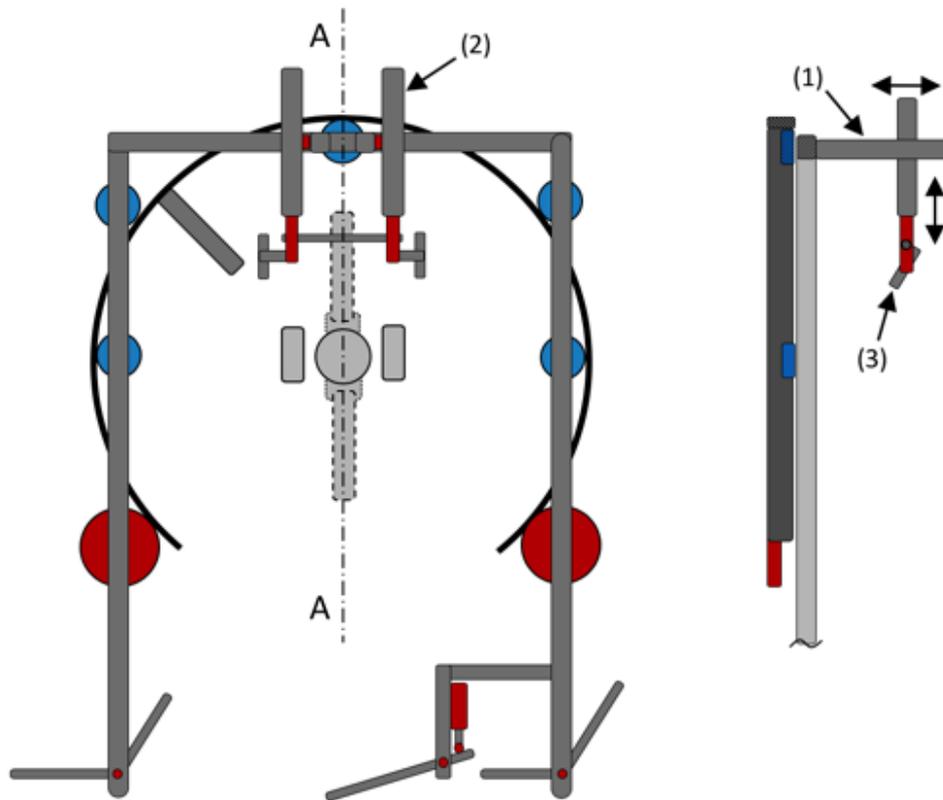


Abbildung 5.13: Lösungskonzept 2, Langmachen

(1)...Linearachse (2)...Teleskopzylinder (3)...Gestänge

5.4.3 LANGMACHEN: LÖSUNGSKONZEPT 3 (LKL3)

Als Grundgerüst für dieses Lösungskonzept (Anheben - Roboterarm - Linearachsen, siehe Tabelle 5.7) dient wiederum eine u-förmige Halterung, visualisiert in Abbildung 5.14. An dieser sind an beiden unteren Enden Teleskopzylinder (1) mit verdrehbaren Greifern (2) angeordnet. Prinzipiell kann dieses Konzept von oben und unten in den Berner-Raum eingebracht werden. Durch den höheren freien Bauraum über der Schraubenkupplung wird ein Einbringen von oben bevorzugt. Für das Langmachen muss die Halterung über die Schraubenkupplung gestülpt und die Greifer auf Höhe der Bremsschläuche positioniert werden. Im Anschluss fahren die Teleskopzylinder aus und die Greifer fassen die Bremsschläuche. Durch ein Anheben der Halterung lassen sich die Bremsschläuche in weiterer Folge öffnen. Die Halterung muss nun so positioniert werden, dass sich der Kupplungsschwengel mit einem Greifer fassen und aufrichten lässt.

Als nächster Schritt findet eine kombinierte Bewegung der Halterung, Teleskopzylinder und Greifer statt, sodass die Schraubenkupplung aufgeschraubt wird. Dazu fasst jeweils ein Greifer den Kupplungsschwengel. Durch ein Heben oder Senken der Halterung und ein Aus- oder Einfahren des Teleskopzylinders erfolgt eine halbe Umdrehung, danach übernimmt der zweite Greifer den Kupplungsschwengel und schraubt die nächste halbe Umdrehung auf.

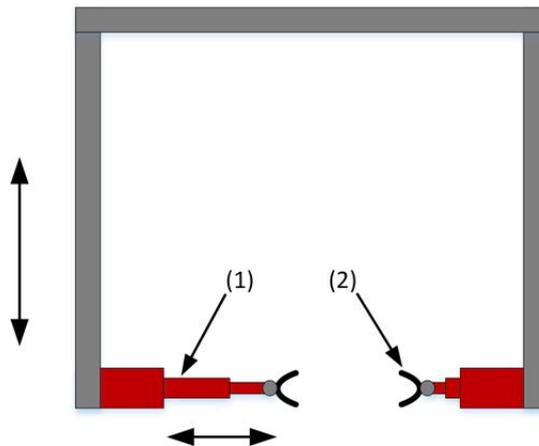


Abbildung 5.14: Lösungskonzept 3, Langmachen

(1)...Teleskopzylinder (2)...verdrehbarer Greifer

5.5 DETAILLIERUNG DER LÖSUNGSKONZEPTE FÜR DAS ENTKUPPELN

Die Weiterentwicklung und Detaillierung der ausgewählten Lösungskonzepte für das Entkuppeln (Abbildung 5.10) werden im Folgenden näher beschrieben.

5.5.1 ENTKUPPELN: LÖSUNGSKONZEPT 2 (LKE2)

Für das Lösungskonzept 2 (Seil - Mehrere Angriffspunkte - Scherenhub, siehe Tabelle 5.13) muss eine geeignete Form entworfen werden, um die Schraubenkupplung an mehreren Angriffspunkten zu fassen. Dies lässt sich durch eine u-förmige Platte (Aushängeplatte) realisieren, siehe Abbildung 5.15 und 5.16. Durch die entsprechenden Abmessungen fassen sowohl die Laschen der Aushängeplatte (seitlich) als auch die Basis der Aushängeplatte (unten) Kupplungsbügel und Kupplungslasche.

Die Laschen der Aushängeplatte sind für das Entkuppeln von besonderer Bedeutung, da sie ein Verhängen im Zughaken (Kapitel 3.2.2) verhindern. Um nicht durch herabhängende Kupplungsschwengel behindert zu werden, befindet sich in der Mitte der Aushängeplatte eine entsprechende Ausnehmung ($250\text{ mm} \cdot 100\text{ mm}$). Ebenso sollen die seitlichen Ausnehmungen ($80\text{ mm} \cdot 80\text{ mm}$) eine Kollision mit den beidseitigen Zughaken (Breite: 55 mm , Abbildung 3.16) verhindern (Abbildung 5.16). Aufgrund der symmetrischen Ausführung der Aushängeplatte, können Schraubenkupplungen auf beiden Seiten einer Trennstelle ausgehängt werden.

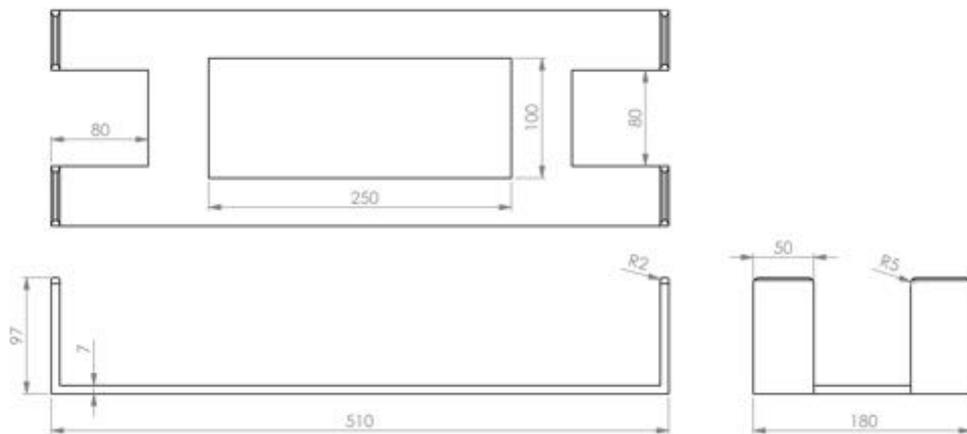


Abbildung 5.15: Detaillierung Aushängeplatte

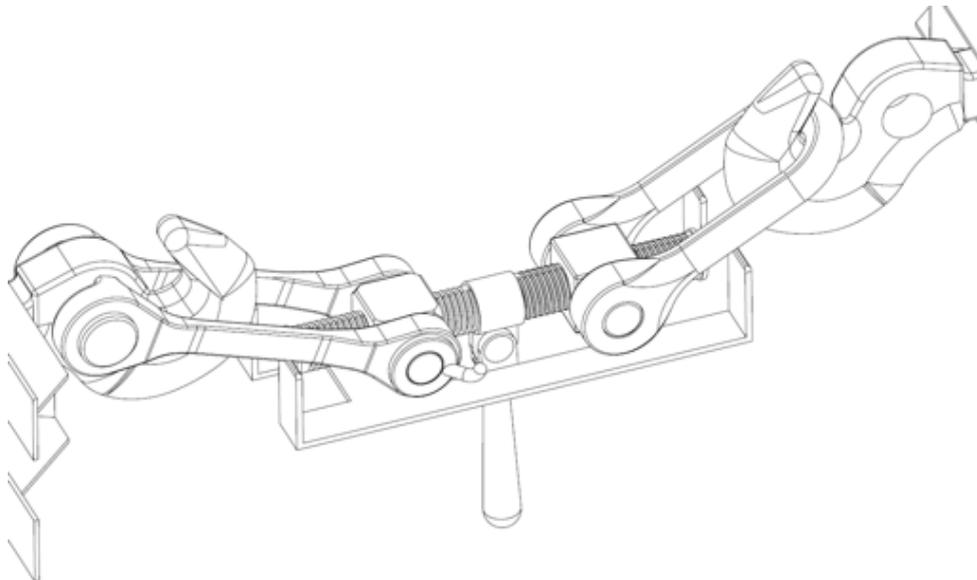


Abbildung 5.16: Aushängeplatte in Kontakt mit der Schraubenkupplung

Lösungskonzept 2 besteht aus einem Scherenhub (1), der an den Enden auf Führungen (2) befestigt wird, siehe Abbildung 5.17. Diese Führungen sind auf beiden Seiten jeweils durch Querverbindungen (3) miteinander verbunden. Je Querverbindung erfolgt eine Einspannung (4) eines Seils, welches die Bewegung des Scherenhubes ermöglicht und über Seilscheiben (5) angetrieben wird. Bewegen sich die Seile synchron, bleibt der Scherenhub eingeklappt und kann sich unterhalb des Zuges in Seilrichtung frei bewegen. Um zu entkuppeln positioniert sich der Scherenhub unter der Schraubenkupplung, klappt durch eine unterschiedliche Bewegung der Seile hoch und hebt mit der Aushängeplatte (6) den Kupplungsbügel aus dem Zughaken.

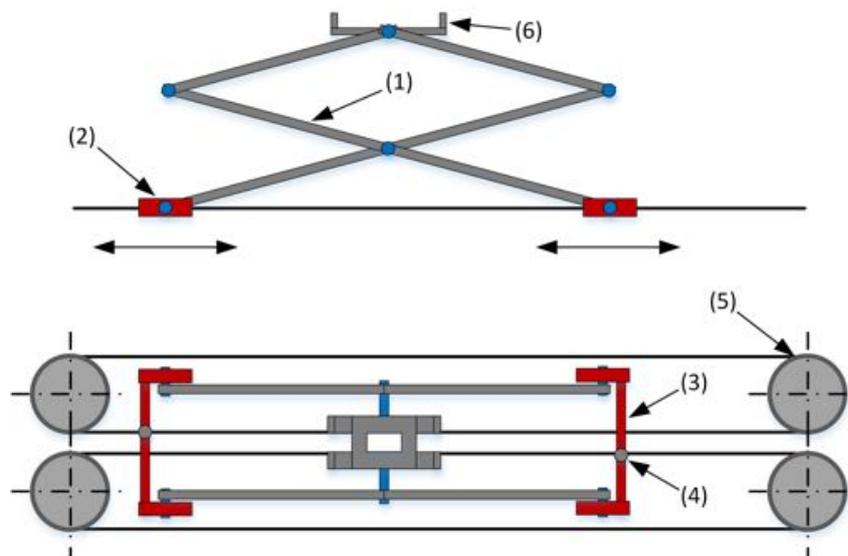


Abbildung 5.17: Lösungskonzept 2, Entkuppeln, detailliert

(1)...Scherenhub (2)...Führung (3)...Querverbindung (4)...Einspannung (5)...Seilscheibe,
(6)...Aushängeplatte

5.5.2 ENTKUPPELN: LÖSUNGSKONZEPT 3 (LKE3)

Bei diesem Lösungskonzept (Seil - Ein Angriffspunkt - Teleskopzylinder, siehe Tabelle 5.13) befindet sich der Mechanismus, im Gegensatz zu LkE 2 und 4, seitlich neben dem Gleis. Auf einer geführten Plattform (1) ist ein vertikales Mehrfachteleskop (2) angebaut, ersichtlich in Abbildung 5.18. Auf diesem befindet sich ein weiteres Mehrfachteleskop (3), an dessen Ende die Entkupplungsstange (4) angebracht ist. Durch diese Entkupplungsstange lässt sich der Kupplungsbügel gezielt aus dem Zughaken heben (siehe Kapitel 5.3.3). Die Bewegung der Plattform erfolgt durch ein Seil (5).

Durch den einzelnen Angriffspunkt muss erkannt werden, welche Schraubenkupplung (vorne oder hinten) verwendet wird, um den Mechanismus an der richtigen Stelle, knapp neben dem Zughaken und unter dem Kupplungsbügel, zu positionieren. Für ein Entkuppeln an fahrenden Zügen beschleunigt die Plattform und positioniert sich seitlich entlang des Zuges auf Höhe der Schraubenkupplung. Anschließend fahren die Teleskopzylinder geordnet aus, positionieren die Entkuppelungsstange unterhalb des Kupplungsbügels und heben in weiterer Folge den Kupplungsbügel aus dem Zughaken.

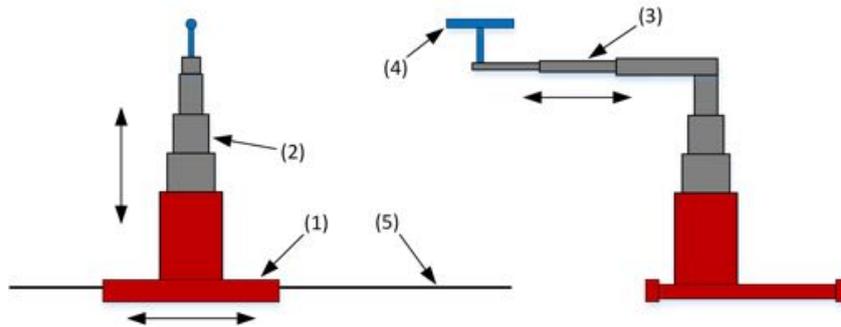


Abbildung 5.18: Lösungskonzept 3, Entkuppeln

(1)...Plattform (2)/(3)...Teleskopzylinder (4)...Entkuppelungsstange (5)...Seil

5.5.3 ENTKUPPELN: LÖSUNGSKONZEPT 4 (LKE4)

Dieses Lösungskonzept (Zahnstange - Ein Angriffspunkt - Scherenhub, siehe Tabelle 5.13) basiert grundsätzlich wie LkE 2 auf der Idee des Scherenhubs, allerdings reduziert auf einen Kniehebel (1). Identisch mit LkE 2 sind auch die unteren Enden des Kniehebels auf Führungen (2) befestigt und mit Querverbindungen (3) verbunden. Im Gegensatz dazu erfolgt der Antrieb über Zahnstangen und nicht mittels Seile (Abbildung 5.19). Der Motor plus Ritzel (4) ist dazu an den Führungen befestigt.

Um zu entkuppeln, beschleunigt der eingeklappte Kniehebel unter dem Zug und positioniert sich unterhalb des Kupplungsbügels (synchroner Betrieb der Antriebe). Durch eine Geschwindigkeitsdifferenz der Antriebe klappt der Kniehebel hoch und hebt mit der Entkuppelungsstange (5) den Kupplungsbügel aus dem Zughaken. Wie bei LkE 3 muss die verwendete Schraubenkupplung (vorne oder hinten) erkannt werden.

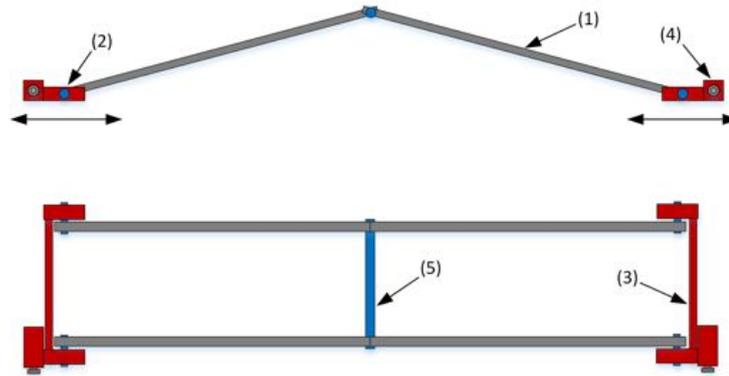


Abbildung 5.19: Lösungskonzept 4, Entkuppeln

(1)...Kniehebel (2)...Führung (3)...Querverbindung (4)...Motor/Ritzel
 (5)...Entkuppelstange

5.6 TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

Die vorgestellten Lösungskonzepte aus Kapitel 5.4 und 5.5 werden nun anhand ausgewählter technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet. Die nachfolgenden Tabellen 5.14 und 5.15 stellen die Ergebnisse der Bewertung dar. Aufgrund der noch unbekannt Details der Konzepte (Art der Herstellung, Materialien,...) ist eine wirtschaftliche Bewertung nur eingeschränkt qualitativ und nicht mit allen Aspekten möglich. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Richtlinie VDI 2225, daher weisen alle Kriterien die gleiche Gewichtung auf. Es können 0 bis 4 Punkte je Kriterium vergeben werden. Die Gesamtsumme des jeweiligen Konzeptes, dividiert durch die Höchstpunktzahl ergibt die Wertigkeit (0 bis 1).

Technische Kriterien	Konzepte Langmachen			Konzepte Entkuppeln		
	LkL1	LkL2	LkL3	LkE2	LkE3	LkE4
Robustes Langmachen / Entkuppeln	4	4	1	4	3	3
Einfacher Ablauf / Betrieb	4	3	0	4	3	3
Schneller Bewegungsablauf	3	3	1	4	3	4
Geringe Änderungen der Infrastruktur	2	2	2	4	3	4
Geringe Einschränkungen der Verschubmitarbeiter	2	2	2	4	2	4
Geringer Platzbedarf im Kupplungsbereich	1	1	3	3	4	4
Einfache Konstruktion	3	3	4	4	4	4
Geringe bewegte Masse	1	1	3	3	1	3
Geringer Verkabelungsaufwand	2	2	3	4	4	2
Geringe Bauhöhe (im Standby)	1	1	2	3	2	4
Summe	23	22	21	37	29	35
Techn. Wertigkeit $W_t = \frac{\text{Summe}}{40}$	0,58	0,55	0,53	0,93	0,73	0,88

Tabelle 5.14: Technische Bewertung der detaillierten Lösungskonzepte

Wirtschaftliche Kriterien	Konzepte Langmachen			Konzepte Entkuppeln		
	LkL1	LkL2	LkL3	LkE2	LkE3	LkE4
Kostengünstige Elemente	3	3	4	4	2	4
In eigener Werkstatt fertigbar	3	3	4	3	3	4
Geringer Einbauaufwand	2	2	3	4	3	3
Schneller / einfacher Komponententausch	3	3	3	4	3	4
Geringe Anzahl an Antrieben	3	2	2	4	3	4
Geringer Sensorikanteil	3	2	1	4	4	4
Summe	17	15	17	23	18	23
Wirtsch. Wertigkeit $W_w = \frac{\text{Summe}}{24}$	0,71	0,63	0,71	0,96	0,75	0,96

Tabelle 5.15: Wirtschaftliche Bewertung der detaillierten Lösungskonzepte

Besonders bei den Lösungskonzepten für das Langmachen ist eine weitere Ausarbeitung notwendig. So ist für eine vollständigere Bewertung ein Ansatz für den Transport der Vorrichtung zwischen den Trennstellen und die Positionierung zur Schraubenkupplung zu ergänzen. Da alle Konzepte von der Seite eingebracht werden, sind Einschränkungen des Raumes zwischen den Gleisen und Einbauten zu erwarten, weshalb die Kriterien „Geringe Änderungen der Infrastruktur“ und „Geringe Einschränkungen der Verschubmitarbeiter“ vorläufig jeweils mit 2 bewertet wurden. Ebenfalls ist die Bauhöhe im „Standby“ noch unklar. Sofern hier durch eine Grube, einklappen et cetera Reduktionen der Bauhöhe und des Platzbedarfes möglich sind, können die Konzepte entsprechend besser bewertet werden. Für die weitere Entwicklung wird LkL 1 favorisiert.

Die Lösungskonzepte für das Entkuppeln weisen im Gegensatz dazu deutlich höhere Wertigkeiten auf und sind vollständiger. Durch die hohe technische Wertigkeit von LkL 2 und 4 mit unterschiedlichen leichten Schwachpunkten kann eine geeignete Kombination zu einem besonders hochwertigen Konzept erfolgen. Dadurch sollen die einzelnen Schwachpunkte ausgeglichen und die Vorteile ausgenutzt werden.

Als zusätzlicher Überblick über die einzelnen Lösungskonzepte dient das in Abbildung 5.20 dargestellte Stärke-Diagramm. Darin ist klar erkennbar, dass die LkE's deutlich höherwertiger als die LkL's sind. Besonders LkE 2 stellt eine hochwertige (Ziel: 1) und bereits relativ ausgeglichene Lösung ($W_w \approx W_t$) dar.

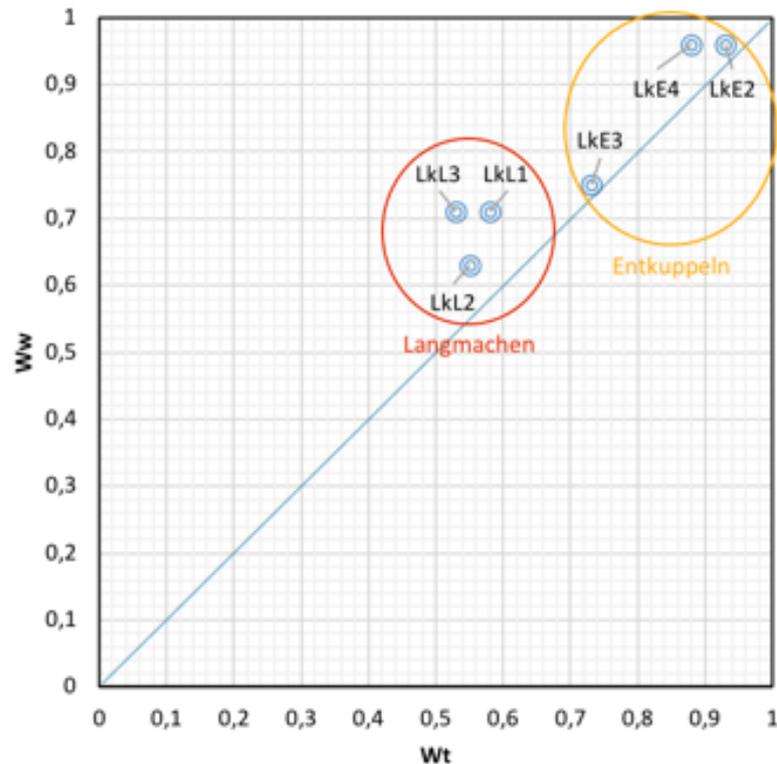


Abbildung 5.20: Stärke-Diagramm

5.7 FINALES KONZEPT: LANGMACHEN

Basierend auf den Ergebnissen der technischen (Tabelle 5.14) und wirtschaftlichen (Tabelle 5.15) Bewertung soll auf Basis des Lösungskonzeptes 1 (LkL1) ein Labordemonstrator aufgebaut und die Wirkprinzipien auf ihre Tauglichkeit hin getestet werden. Sofern sich das Lösungskonzept bewährt, ist die entsprechende Weiterentwicklung noch unbetrachteter Teilfunktionen angedacht (Vorrichtung positionieren, Lösezug betätigen et cetera). Andernfalls findet eine Überarbeitung des Konzeptes statt.

5.8 FINALES KONZEPT: ENTKUPPELN

Das finale Konzept für das Entkuppeln besteht aus den jeweils vorteilhaftesten Komponenten von LkE 2 und 4. Dazu zählen der vereinfachte Scherenhub (Kniehebel), die Aushängeplatte und der Seiltrieb. Diese Kombination (Abbildung 5.21) ergibt mutmaßlich ein optimales Konzept für das Entkuppeln. So ist zum Beispiel keine aufwändige Führung der Motorkabel notwendig und die Masse der Motoren und gegebenenfalls der Getriebe muss nicht mitbewegt werden.

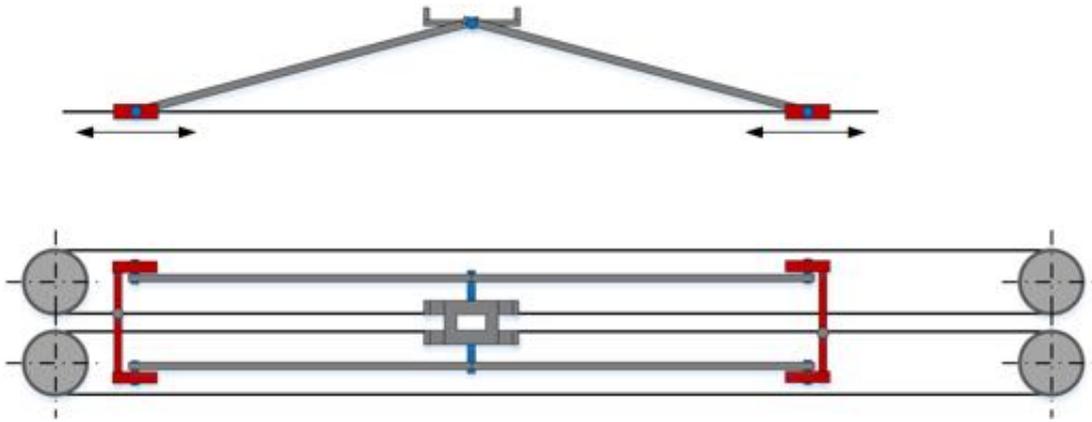


Abbildung 5.21: Finales Lösungskonzept Entkuppeln

5.8.1 MECHANISCHES MODELL FÜR DEN ENTKUPPLUNGSMECHANISMUS

Die Modellbildung soll durch die Anwendung des Lagrange-Formalismus (siehe [49, S.130ff], [50, S.98ff]) umgesetzt werden und dient als Basis für die Abschätzung der auftretenden Kräfte sowie für die Bewegungssimulation und in weiterer Folge für die Regelung der Antriebe. Nachfolgend dazu die entsprechenden Gleichungen (5.4) bis (5.11) sowie die dazugehörige Abbildung 5.22.

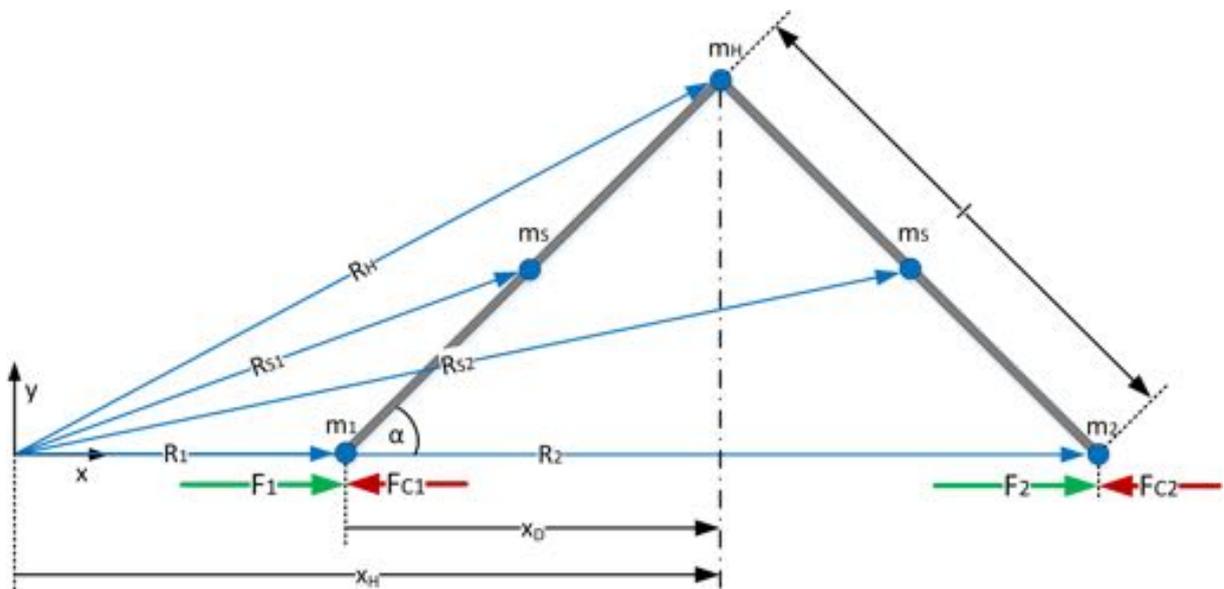


Abbildung 5.22: Modell Entkupplungsmechanismus

$d_{1/2} \cdot \dot{x}$...viskose Reibung	$F_{1/2}$...Antriebskraft	$F_{c1/2}$...Reibungskraft
g ...Erdbeschleunigung	i ...Übersetzungsverhältnis	J_{mg} ...Massenträgheitsmoment Motor und Getriebe
J_s ...Massenträgheitsmoment Stange	l ...Stangenlänge	m_H ...Masse Aushängeplatte
m_s ...Masse Stangen	$m_{1/2}$...Masse Führungsschlitten	n ...Anzahl der Freiheitsgrade
q ...Vektor der Freiheitsgrade	R ...Ortsvektoren	r ...Radius Seilscheibe
T ...kinetische Energie	V ...potentielle Energie	x_H/x_D ...generalisierte Koordinaten

Tabelle 5.16: Bezeichnung der Parameter

$$q = \begin{bmatrix} x_H \\ x_D \end{bmatrix} \quad n = 2 \quad m_{12} = m_1 + m_2 \quad \alpha = \arccos\left(\frac{x_D}{l}\right)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} x_H - x_D \\ 0 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} x_H + x_D \\ 0 \end{bmatrix} \quad R_H = \begin{bmatrix} x_H \\ l \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$R_{S1} = \begin{bmatrix} x_H - \frac{l}{2} \cos(\alpha) \\ \frac{l}{2} \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad R_{S2} = \begin{bmatrix} x_H + \frac{l}{2} \cos(\alpha) \\ \frac{l}{2} \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{R}_1^2$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \dot{R}_2^2$$

$$T_{S1} = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot \dot{R}_{S1}^2 + \frac{J_S}{2} \cdot \dot{\alpha}^2$$

$$T_{S2} = \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot \dot{R}_{S2}^2 + \frac{J_S}{2} \cdot \dot{\alpha}^2$$

$$T_H = \frac{1}{2} \cdot m_H \cdot \dot{R}_h^2$$

$$T_{m1} = \frac{J_{mg}}{2} \cdot \left(\frac{i \cdot (x_H - x_D)}{r}\right)^2$$

$$T_{m2} = \frac{J_{mg}}{2} \cdot \left(\frac{i \cdot (x_H + x_D)}{r}\right)^2$$

$$T = T_1 + T_2 + T_{S1} + T_{S2} + T_H + T_{m1} + T_{m2} \quad (5.4)$$

$$V = l \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot (m_s + m_H) \quad (5.5)$$

Massenmatrix

$$M(q) = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}^2}$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{12} + m_H + 2m_s + \frac{2i^2 J_{mg}}{r^2} & -m_1 + m_2 \\ -m_1 + m_2 & \frac{4i^2 J_{mg} l^2 \cdot (4J_s + l^2 \cdot (2 \cdot m_{12} + m_s)) \cdot r^2 - 2 \cdot (2i^2 J_{mg} + (m_{12} - m_H) \cdot r^2) \cdot x_D^2}{2r^2 \cdot (l^2 - x_D^2)} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Scheinkräfte (Fliehkraft und Corioliskraft)

$$C(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial M[k, j]}{\partial q[i]} + \frac{\partial M[k, i]}{\partial q[j]} - \frac{\partial M[i, j]}{\partial q[k]} \right) \cdot \dot{q}[i] \right) \quad k = \{1, \dots, n\} \quad j = \{1, \dots, n\}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{(4J_s + l^2 \cdot (2 \cdot m_H + m_s)) x_D \dot{x}_D}{2(l^2 - x_D^2)^2} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Gravitationskräfte

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{g(m_H + m_s) x_D}{l \sqrt{1 - \frac{x_D^2}{l^2}}} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Dämpfungskräfte

$$D(\dot{q}) = \begin{bmatrix} d_1(-\dot{x}_D + \dot{x}_H) + d_2(\dot{x}_D + \dot{x}_H) \\ -d_1(-\dot{x}_D + \dot{x}_H) + d_2(\dot{x}_D + \dot{x}_H) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Externe Eingangskräfte

$$Q(\dot{q}) = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 - F_{c1} \cdot \text{sign}(\dot{x}_H - \dot{x}_D) - F_{c2} \cdot \text{sign}(\dot{x}_H + \dot{x}_D) \\ F_2 - F_1 + F_{c1} \cdot \text{sign}(\dot{x}_H - \dot{x}_D) - F_{c2} \cdot \text{sign}(\dot{x}_H + \dot{x}_D) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Modell

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} (-\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \cdot \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{D}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{Q}(\dot{\mathbf{q}})) \quad (5.11)$$

Auf Basis des Modells (5.11) kann das Verhalten der Mechanik für das Entkuppeln simuliert und eine geeignete Regelung entwickelt werden. Durch den konstruktiven Aufbau des Entkupplers ergibt sich ein nichtlineares System, welches durch geeignete Regelungsmethoden abgebildet werden muss. Hierzu wird der Ansatz der exakten Zustandslinearisierung mit Trajektorienfolgeregelung umgesetzt.

Um die in der Ruhelage notwendige Kraft für das Halten der Position abzuschätzen, werden die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte auf Null gesetzt. Aus Gleichung (5.11) lässt sich so durch Umformung die Kraft berechnen (5.12). Wird diese Kraft in der Ruhelage überschritten, so klappt der Kniehebel hoch.

$$\ddot{q} = 0 \quad \dot{q} = 0$$

$$F_{1,Ruhelage} = \frac{g \cdot (m_H + m_s) \cdot x_D}{2 \cdot l \cdot \sqrt{1 - \frac{x_D^2}{l^2}}} \quad (5.12)$$

Anhand von $x_D = \cos(\alpha) \cdot l$ und (5.12) ist ersichtlich, dass die erforderliche Kraft für das Hochklappen stark von α abhängt, veranschaulicht in Abbildung 5.23. Somit soll ein möglichst großer Winkel gewählt werden, der allerdings durch die zulässige Bauhöhe von <SOK (0,19 m) begrenzt ist.

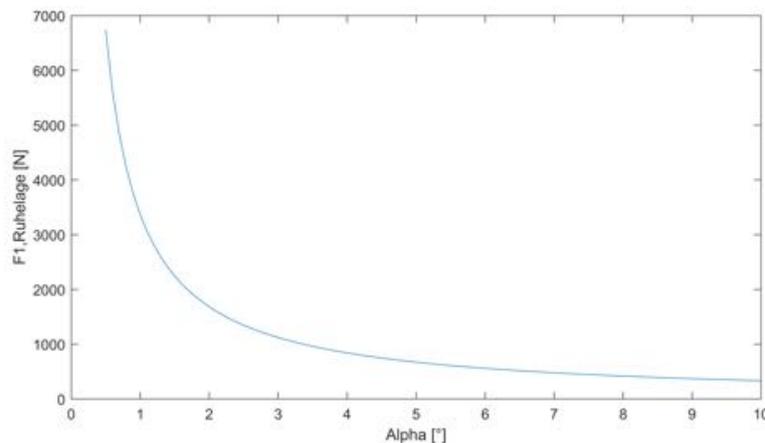


Abbildung 5.23: Erforderliche Kraft für das Hochklappen, in Abhängigkeit von α ($0,5^\circ$ bis 10°)

Zur Berechnung der Kraft werden folgende Werte angenommen:

$$\alpha_{Start} = 4^\circ \quad l = 1,5 \text{ m} \quad m_H = 10 \text{ kg} \quad m_s = 2 \text{ kg}$$

$$x_D = \cos(\alpha_{Start}) \cdot l = \cos(4^\circ) \cdot 1,5 \text{ m} = 1,4963 \text{ m}$$

$$\text{Höhe} = \sin(\alpha_{Start}) \cdot l = \sin(4^\circ) \cdot 1,5 \text{ m} = 0,105 \text{ m}$$

$$F_{1,Ruhelage} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (10 \text{ kg} + 2 \text{ kg}) \cdot 1,4963 \text{ m}}{2 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \frac{(1,4963 \text{ m})^2}{(1,5 \text{ m})^2}}} = 836 \text{ N} \quad (5.13)$$

Die Aufbringung der Kraft (5.13) mit handelsüblichen Motoren und Getrieben ist somit realistisch. Für den Betrieb sind noch die Beschleunigungen und Reibungskräfte zu berücksichtigen. Die Wahl von 4° bietet sowohl eine niedrige Startkraft (836 N) als auch eine ausreichend flache Bauweise (0,105 m).

Die Ergebnisse des simulierten Bewegungsablaufes des Entkuppelns werden ausführlich in Kapitel 8 dargestellt und beschrieben sowie mit realen Messdaten verglichen.

6 LÖSUNGSPRINZIPIEN FÜR DIE SENSORIK

Im Folgenden werden potentielle Sensoren erörtert, die für die Ermittlung der notwendigen Parameter (siehe Kapitel 4.1) notwendig sind. Zu diesen Parametern zählen:

- Position der Trennstellen (Positionen an denen der Zug getrennt werden soll)
- Kupplungsposition (um die Vorrichtung entsprechend zu positionieren)
- Kupplungsgeschwindigkeit (entspricht der Güterwagengeschwindigkeit)
- Status der Schraubenkupplung (langgemacht oder nicht langgemacht)
- Position des Lösezuges (Griff der betätigt werden muss)

Sensoren für die Bestimmung der Kupplungsgeschwindigkeit

Um die Kupplungsgeschwindigkeit zu ermitteln sind Sensoren notwendig, die sowohl berührungslos und ohne Umbau der Güterwagen, als auch bei niedrigen Geschwindigkeiten funktionieren. Es müssen Geschwindigkeiten ab $0,1 \frac{m}{s}$ messbar sein (siehe Kapitel 4.3.2). Die gemessene Geschwindigkeit dient dazu, die Position der Schraubenkupplung durch Integration in Bereichen ohne Positionsbestimmung zu schätzen. Nachstehend eine Auflistung verschiedener Sensoren und Ansätze, die für die Bestimmung der Geschwindigkeit in Frage kommen:

- Lichtschranke
- Achszähler (Radsensor)
- Radar
- Laserdistanzsensor
- Farb- oder Graustufenkamera
- Optische Komplettsysteme

- Laser surface velocimeter

Sensoren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung

Um die Schraubenkupplung (Position, Status) und den Lösezug (Position, Orientierung) zu detektieren, muss ein Sensorsystem eingesetzt werden, welches es ermöglicht, die Strukturen von Schraubenkupplung, Lösezug oder Vergleichbares zu erfassen. Des Weiteren ist der Status der Schraubenkupplung (langgemacht, nicht langgemacht, verwendete Schraubenkupplung) zu detektieren. Diese Voraussetzungen erfüllen optische Verfahren ideal, weshalb die Suche nach geeigneten Systemen darauf eingeschränkt wurde. Die nachfolgende Auflistung bietet einen Überblick über mögliche Sensoren:

- Time-of-flight Kamera
- Laserscanner
- Farb- oder Graustufenkamera

Sensoren für die Ermittlung der Trennstellen

Für die Ermittlung der Positionen von Trennstellen lassen sich sowohl absolute als auch relative Verfahren einsetzen. Zum Beispiel erfolgt durch die optische Erkennung der Wagenummer eine absolute Bestimmung der Trennstelle. Während hingegen durch die Zählung von Achsen oder Schraubenkupplungen die Trennstellen nur relativ bestimmt werden können. Die Erkennung von Schraubenkupplungen macht ebenso wie die Wagerkennung optische Verfahren notwendig. Die folgende Auflistung stellt eine Übersicht über potentielle Sensoren zur Ermittlung der Trennstelle dar:

- Achszähler (Radsensor)
- Farb- oder Graustufenkamera
- Lichtschranke
- Time-of-flight Kamera
- Laserscanner

6.1 SENSOREN FÜR DIE GESCHWINDIGKEITSMESSUNG

Die Geschwindigkeitsmessung des Zuges stellt eine schwierige Aufgabe dar, da die auftretenden Geschwindigkeiten in einem sehr niedrigen Bereich liegen ($\leq 2,5 \frac{m}{s}$) und weil die Messung nicht direkt am Zug (Tachogenerator) sondern nur von außen (neben dem Zug) erfolgen kann. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die sich in weiterer Folge zu einem Gesamtergebnis fusionieren lassen. An diese Geschwindigkeit werden hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt ($\pm 0,026 \frac{m}{s}$, Kapitel 4.3.2), um einen maximal tolerierbaren Fehler in der Positionsberechnung von $\pm 0,05 m$ sicherzustellen.

6.1.1 LICHTSCHRANKE

Für eine Geschwindigkeitsmessung müssen mehrere Lichtschranken entlang des Gleises eingesetzt werden. Fährt ein Zug durch die Lichtschranke, kommt es zu Unterbrechungen, die zwischen den einzelnen Lichtschranken zeitversetzt auftreten. Dieser zeitliche Versatz kann bei bekanntem Abstand zwischen den Lichtschranken in eine Geschwindigkeit umgerechnet werden. Dabei hängen sowohl die Genauigkeit als auch die Auflösung der ermittelbaren Geschwindigkeit von der Schaltfrequenz des Sensors f_S , der Abtastrate der Datenerfassung f_D sowie dem Abstand zwischen den Sensoren d_S ab, siehe (6.1) bis (6.4).

Um bei niedrigen Geschwindigkeiten die Zeitspanne zwischen den Unterbrechungen der Lichtschranken kurz zu halten, muss ein möglichst kleiner Abstand zwischen den Sensoren gewählt werden. Dies steht im klaren Widerspruch zu dem einzuhaltenden Fehler von $0,026 \frac{m}{s}$ bei hohen Geschwindigkeiten (möglichst viele Sensormesswerte). Somit liegt der limitierende Parameter bei der erforderlichen Mindestanzahl an Messwerten bei $2,5 \frac{m}{s}$ (6.1). Dies führt in Abhängigkeit von der Abtastrate zu einem notwendigen Mindestabstand zwischen den Sensoren (6.2). Dies bedeutet allerdings auch, dass bei einer Geschwindigkeit von $0,1 \frac{m}{s}$ der Mittelwert der Zuggeschwindigkeit über einen langen Zeitraum gebildet wird. Durch zum Beispiel höhere Abtastraten der Sensoren und der Datenerfassung lässt sich der Abstand bei gleichbleibendem Fehler verringern. Mit diesem Prinzip kann somit eine nahezu beliebige Messwertauflösung und Messwertgenauigkeit erreicht werden.

Nachteilig ist, dass die Lichtschranke auch von Menschen, Blättern et cetera unterbrechbar ist, die Zuordnung der Unterbrechungen mitunter Schwierigkeiten bereitet und nur eine sehr geringe Anzahl an Geschwindigkeitswerten generiert wird.

Durch den Aufbau von Güterwagen kommt es je nach Ausführung der Güterwagen und Position der Lichtschranken nur zu einigen Unterbrechungen pro Güterwagen (zum Beispiel entstehen bei einer Positionierung auf Höhe der Räder zwei Geschwindigkeitswerte pro Rad). Ebenso handelt es sich immer um eine Mittelung und keine Momentangeschwindigkeit.

Im nachfolgenden Beispiel gilt es den notwendigen Abstand zwischen den Sensoren zu ermitteln:

$$f_S = 1 \text{ kHz} \quad f_D = 3 \text{ kHz} \quad v_{Zug} = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad sm \dots \text{Anzahl an Sensormesswerten}$$

Um die notwendige Anzahl an Sensormesswerten zu ermitteln muss die Maximalgeschwindigkeit durch die zu erreichende Auflösung dividiert werden. Damit der Fehler trotz der Messungenauigkeit $\leq 0,026 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bleibt ist die zeitliche Auflösung der Sensoren zu berücksichtigen. Die Messungenauigkeit ergibt sich aus f_S und f_D zu $1,33 \text{ ms}$ und in diesem Fall somit zu $1,33$ Messwerten. Weitere Effekte bleiben unberücksichtigt.

$$sm = \frac{v_{Zug} \cdot 1,33}{\Delta v} = \frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,33}{0,026 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 128 \quad \Rightarrow \quad \Delta t = 128 \cdot \frac{1}{f_S} = 128 \text{ ms} \quad (6.1)$$

$$d_S = v_{Zug} \cdot \Delta t = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,128 \text{ s} = 0,32 \text{ m} \quad (6.2)$$

Die Messwertauflösung (Geschwindigkeit) liegt bei

$$\frac{v_{Zug}}{sm} = \frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{128} = 0,0195 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.3)$$

mit einer Genauigkeit von

$$1,33 \text{ Sensormesswerten} \quad \Rightarrow \quad 0,0195 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,33 = 0,0259 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.4)$$

6.1.2 RADSENSOR

Radsensoren sind ein Standardelement des Eisenbahnverkehrs und werden auf der Innenseite einer Schiene montiert, siehe Abbildung 6.1. Mit ihnen lassen sich unter anderem die Anzahl der überfahrenden Achsen, die Zuggeschwindigkeit sowie die Fahrtrichtung ermitteln. Zum Einsatz kommen Radsensoren bei Gleisfreimeldungen (Achszählung), Ein- und Ausschaltung von Bahnübergängen, Freigabe von Weichen et cetera. Die Radsensoren erkennen durch eingebaute induktive Sensoren die Räder der Güterwagen und liefern entsprechende Signale. Sind nun zwei Radsensoren im Einsatz oder besitzt ein Radsensor zwei induktive Sensoren, so kann aus den zeitlich versetzten Signalen bei einer Überfahrt Fahrtrichtung und Geschwindigkeit ermittelt werden. Das Prinzip zur Ermittlung der Zugeschwindigkeit ist identisch mit der Auswertung der Lichtschranken in Kapitel 6.1.1.



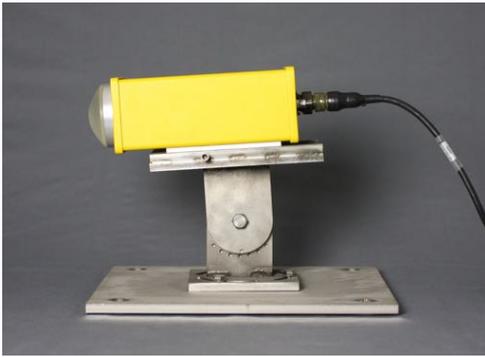
Abbildung 6.1: Beispiel für einen Radsensor [51]

6.1.3 RADAR

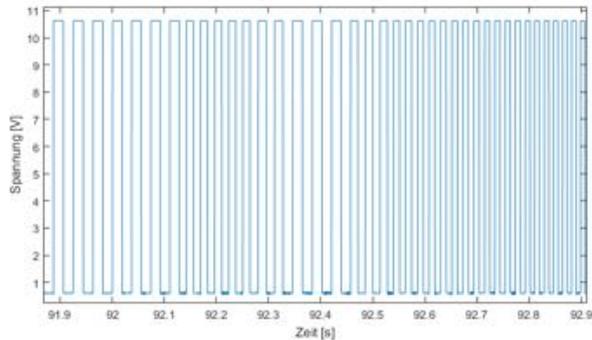
Zur Verwendung von Radar zur Geschwindigkeitsmessung gibt es bestehende Systeme, die speziell für den Verschub entwickelt wurden und daher bestens für die Anforderungen bezüglich der Umgebungsbedingungen et cetera geeignet sind. Für die Entwicklung einer automatischen Trennvorrichtung bietet sich das Radargerät der Firma Radarlux (Abbildung 6.2) an, welches ein Rechtecksignal liefert, dessen Frequenz sich linear zur gemessenen Geschwindigkeit verändert. Aus dieser Frequenz lässt sich direkt die Geschwindigkeit berechnen. Die Funktionsweise des Geräts basiert auf dem Doppler-Effekt.

Der Doppler-Effekt beruht darauf, dass sich die Frequenz eines von einer Quelle ausgesendeten Signals von der Frequenz unterscheidet, die ein Beobachter, der sich relativ zur Quelle bewegt, wahrnimmt. Es können verschiedene Situationen auftreten:

- Die Quelle bewegt sich und der Beobachter steht still
- Die Quelle steht still und der Beobachter bewegt sich
- Beide bewegen sich



(a) Radargerät der Firma Radarlux [52]



(b) Ausgangssignal des Radargeräts

Abbildung 6.2: Bild eines Radargeräts und Beispiel des Signalverlaufs

Für den Doppler-Effekt ist jeweils nur die relative Bewegung zwischen Quelle und Beobachter entscheidend. Durch diese Eigenschaften bietet sich die Ausnutzung des Doppler-Effekts bestens zur Geschwindigkeitsmessung an und wird verstärkt in Radargeräten eingesetzt. Damit können Geschwindigkeiten ab zirka $0,1 \frac{m}{s}$ gemessen werden. [vgl. 53, S.120]

Die Quelle (Radargerät) befindet sich seitlich neben dem Gleis und ist gleichzeitig der Beobachter der vom Zug reflektierten Radarsignale. Daher wirkt der Doppler-Effekt doppelt. Zuerst ist das Radargerät die Quelle und der Zug der Beobachter, der Zug reflektiert wiederum die beobachtete Frequenz und wird so zur Quelle und das Radargerät zum Beobachter.

Beispiel: Zug fährt vom Radargerät weg

$$\begin{aligned}
 f_{QS} &\dots \text{Quellfrequenz Radargerät} & f_{BS} &\dots \text{Beobachtungsfrequenz Radargerät} \\
 f_{QZ} &\dots \text{Quellfrequenz Zug} & f_{BZ} &\dots \text{Beobachtungsfrequenz Zug} & v_{Zug} &\dots \text{Zuggeschwindigkeit} \\
 & & & & c &\dots \text{Geschwindigkeit der Welle}
 \end{aligned}$$

$$f_{BZ} = f_{QS} \cdot \left(1 - \frac{v_{BZ}}{c}\right) \quad f_{BS} = \frac{f_{QZ}}{\left(1 + \frac{v_{QZ}}{c}\right)} \quad (6.5)$$

$$f_{BZ} = f_{QZ} \quad v_{BZ} = v_{QZ} = v_{Zug} \quad \Rightarrow \quad f_{BS} = \frac{f_{QS} \cdot \left(1 - \frac{v_{Zug}}{c}\right)}{\left(1 + \frac{v_{Zug}}{c}\right)} \quad (6.6)$$

$$f_{QS} = 24,125 \text{ GHz (Radarlux)} \quad v_{Zug} = 1 \frac{m}{s} \quad c \approx 300.000.000 \frac{m}{s}$$

$$\Delta f = |f_{QS} - f_{BS}| = |24,125 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot \left(1 - \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{300.000.000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right) - \left(1 + \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{300.000.000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)| = 160,8333 \text{ Hz} \quad (6.7)$$

Das Radargerät der Firma Radarlux besitzt als Signalausgang ein Rechtecksignal mit der Frequenz Δf und dem Umrechnungsfaktor $160,8 \frac{\text{Hz} \cdot \text{s}}{\text{m}}$ für die Geschwindigkeit.

6.1.4 LASERDISTANZSENSOR

Zum Gleis senkrecht angeordnete Laserdistanzsensoren können in Verbindung mit einer Kreuzkorrelation (eindimensional) für eine Geschwindigkeitsmessung eingesetzt werden. Als Basis für die Kreuzkorrelation müssen zeitlich versetzte, gleiche Signale vorliegen, aus denen die Kreuzkorrelation den Versatz ermittelt. Durch eine Distanzmessung zu einem vorbeifahrenden Zug ergibt sich, durch hervorstehende oder zurückstehende Strukturen der Güterwagen, ein sich verändernder Signalverlauf. Eine detaillierte Beschreibung folgt in Kapitel 7.1.1.

Ein Großteil der Laserdistanzsensoren funktioniert nach dem Prinzip der Triangulation, ein optisches Verfahren, mit dessen Hilfe die Entfernung zwischen Sensor und Objekt bestimmt werden kann. Dazu wird ein gebündelter Lichtstrahl (Laser oder Led) ausgestrahlt, von dem Objekt reflektiert und vom Sensor detektiert (Abbildung 6.3). Die Oberflächenbeschaffenheit des Objekts ist von entscheidender Bedeutung, da diese die Streuung zum Sensor ermöglichen muss. Spiegelnnde Oberflächen sind deshalb nahezu unmöglich zu detektieren. Das zum Sensor gestreute Licht trifft zuerst auf die Linse und wird weiter zum Detektor (zum Beispiel CCD, charge-coupled device) geleitet. Dort wird der Lichtstrahl an der Position x abgebildet. Ändert sich der Abstand des Objektes zum Sensor, so ändert sich auch die Position x . [vgl. 53, S.170]

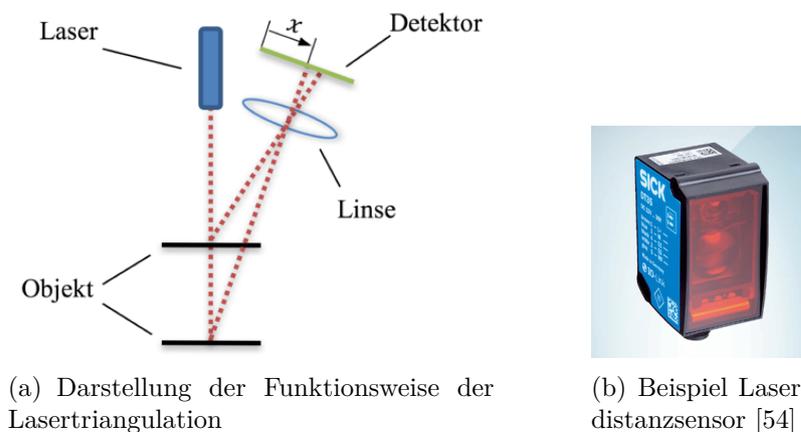


Abbildung 6.3: Lasertriangulation und Laserdistanzsensor

Ein wesentlicher Vorteil dieser Messung ist die Möglichkeit, kontinuierlich zu messen. Darüber hinaus ist im Vergleich zur Laufzeitmessung (siehe Kapitel 6.2.1) keine hochgenaue Messung der Zeit notwendig, da das Verfahren rein geometrisch arbeitet. Als wesentlicher Nachteil gilt die Fremdlichtempfindlichkeit und die Problematik mit ungleichmäßig reflektierenden Oberflächen, was durch eine starke Bündelung teilweise kompensiert werden kann. Die Lichtstärke sowie der geometrische Aufbau des Sensors geben die maximal messbare Entfernung vor. Üblicherweise können 50 m bis 100 m erreicht werden.

Letztlich basiert die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit anhand des ermittelten zeitlichen Versatzes nach demselben Prinzip wie bei Lichtschranken (siehe Kapitel 6.1.1).

6.1.5 FARB- ODER GRAUSTUFENKAMERA

Farb- oder Graustufenkameras eignen sich für die zweidimensionale Kreuzkorrelation. Diese funktioniert grundsätzlich nach demselben Schema wie die eindimensionale Kreuzkorrelation, allerdings findet hierbei die Ermittlung der Verschiebung anhand von Bildern (zweidimensionale Daten) statt. Zur Anwendung genügt eine einzelne Kamera, an der der Zug vorbeifährt. Der Versatz px (Pixel) lässt sich dann zwischen den Einzelbildern errechnen. Die Messwertauflösung (Geschwindigkeit) ist hauptsächlich durch die Pixelgröße des Kamerasensors px_{size} , die Brennweite b_s und den Abstand zum Objekt d_{obj} definiert (6.9). Aus der Linsengleichung erhält man die Formel für die Berechnung der Zuggeschwindigkeit (6.8).

$$v_{Zug} = \frac{px \cdot px_{size} \cdot \left(\frac{d_{obj}}{b_s} - 1\right)}{\Delta t} \quad (6.8)$$

Beispiel mit konkreten Daten einer Kamera:

$$px_{size} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad b_s = 0,006 \text{ m} \quad d_{obj} = 1,85 \text{ m} \quad \text{Bildrate} = 50 \text{ Hz}$$

Daraus ergibt sich eine geometrische Auflösung von

$$px_{size} \cdot \left(\frac{d_{obj}}{b_s} - 1\right) = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \left(\frac{1,85 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} - 1\right) = 0,00148 \text{ m}$$

Kombiniert mit der Zeitspanne Δt zwischen den Bildern ergibt sich die Messwertauflösung.

$$\frac{px_{size} \cdot \left(\frac{d_{obj}}{b_s} - 1\right)}{\Delta t} = \frac{0,00148 \text{ m}}{0,02 \text{ s}} = 0,074 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6.9)$$

Eine Zuggeschwindigkeit von $2,5 \frac{m}{s}$ führt so zu einer Verschiebung von

$$px = \frac{v_{Zug}}{0,074 \frac{m}{s}} = \frac{2,5 \frac{m}{s}}{0,074 \frac{m}{s}} = 33,8 \text{ Pixel} \quad (6.10)$$

Aus (6.9) wird deutlich, dass sich mit dem Faktor der Vergrößerung der Zeitspanne Δt (Verschlechterung der zeitlichen Auflösung) die Messwertauflösung mit demselben Faktor verbessert.

Sowohl die 2D-Kreuzkorrelation als auch optische Komplettsysteme (siehe Kapitel 6.1.6) funktionieren am besten bei gleichbleibender und bekannter Entfernung zum Messobjekt. Für den Einsatz im automatischen Trennprozess müssen diese Sensoren allerdings neben dem Gleis fest montiert werden. Problematisch sind hierbei die unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen der einzelnen Güterwagen sowie hervorstehende Elemente (es treten Schwankungen von über $\Delta d_{obj} = \pm 0,1 m$ auf), was die Definition einer Messebene mit bestimmtem Abstand erschwert. Eine Verschlechterung der Genauigkeit ist somit zu erwarten, siehe (6.12). Zusätzlich können Probleme bei der korrekten Geschwindigkeitsermittlung auftreten, sofern sich mehrere Objekte (zum Beispiel Personen im Hintergrund) durch das Sichtfeld bewegen.

Der geometrische Fehler bei Δd_{obj} ergibt sich zu

$$px_{size} \cdot \left(\frac{\Delta d_{obj}}{b_s} - 1 \right) = 4,8 \cdot 10^{-6} m \cdot \left(\frac{\pm 0,1 m}{0,006 m} - 1 \right) = \pm 0,00008 m \quad (6.11)$$

woraus sich in Abhängigkeit von Δt der Messwertfehler pro Pixel ergibt.

$$\frac{px_{size} \cdot \left(\frac{\Delta d_{obj}}{b_s} - 1 \right)}{\Delta t} = \frac{\pm 0,00008 m}{0,02 s} = \pm 0,004 \frac{m}{s} \quad (6.12)$$

Mit (6.10) führt dieser Messwertfehler zu einer Abweichung von:

$$\pm 0,004 \frac{m}{s} \cdot 33,8 = \pm 0,135 \frac{m}{s}$$

6.1.6 OPTISCHE KOMPLETTSYSTEME

Zur Ermittlung der Geschwindigkeit existieren auch optische Sensorsysteme, wie LUXACT der Firma imc Meßsysteme, welche auch für den Eisenbahnbetrieb ausgelegt sind. Der Sensor befindet sich in diesem Fall fest montiert auf dem Zug und ist auf den Boden gerichtet. Es erscheint allerdings möglich, den Sensor fest im Gleisbereich zu verbauen und die Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Zuges zu messen.

LUXACT zeichnet sich besonders durch die blendenfreie Technik (Anmerkung: Herstellerangabe) und die Messung auf schwierigsten Oberflächen (Schnee, Eis, Schotter,...) aus. Die genaue Funktionsweise wurde vom Hersteller nicht veröffentlicht. Optische Komplettsysteme weisen dieselben Nachteile wie die 2D-Kreuzkorrelation auf (siehe Kapitel 6.1.5).

6.1.7 LASER-SURFACE-VELOCIMETER

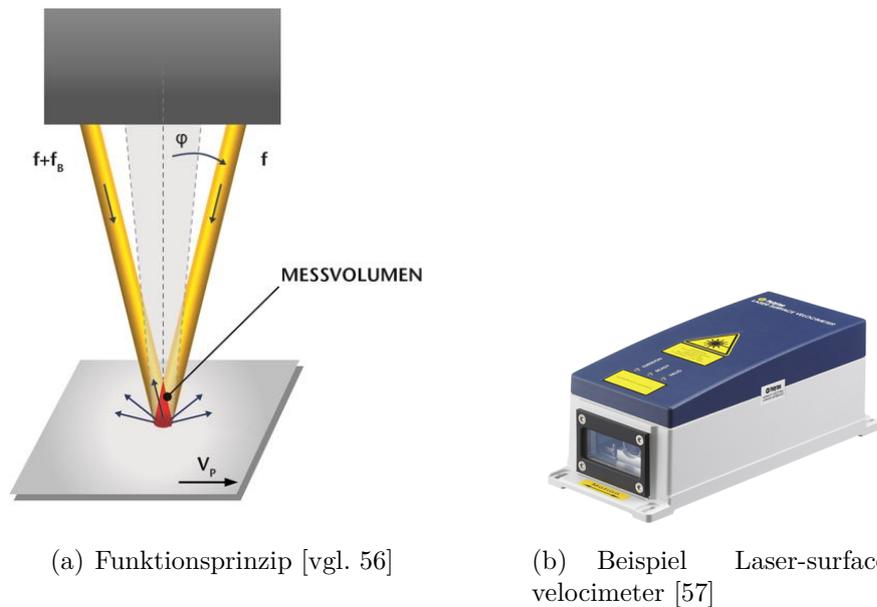
Laser-surface-velocimeter basieren auf dem sogenannten Differenz-Doppler-Verfahren. Dabei wird der Lichtstrahl eines Lasers mit der Wellenlänge λ auf zwei Strahlen aufgeteilt (siehe Abbildung 6.4), die sich im Winkel $2 \cdot \varphi$ schneiden (der Schnittbereich wird als Messvolumen bezeichnet). Bewegt sich nun ein Element durch dieses Messvolumen, verschieben sich die Frequenzen der Laserstrahlen entsprechend des Doppler-Effektes. Die verschobene Frequenz f_1 eines Laserstrahls berechnet sich aus der ursprünglichen Frequenz zu:

$$f_1 = f_0 \cdot \sqrt{\frac{c + v_{PS}}{c - v_{PS}}}$$

mit der Geschwindigkeit v_{PS} in Strahlrichtung. Das zu messende Element bewegt sich mit der Geschwindigkeit v_P parallel zum Laser-surface-velocimeter durch das Messvolumen, wodurch nur ein kleiner Anteil der Elementgeschwindigkeit in Strahlrichtung wirkt ($v_{PS} = v_P \cdot \sin(\varphi)$). Detektor und nachgeschaltete Elektronik können die entstehende Frequenzänderung eines Strahls jedoch kaum auswerten, weswegen zwei Strahlen mit den Winkeln φ und $-\varphi$ eingesetzt werden. Dabei entstehen zwei leicht unterschiedliche Frequenzen, die in der Empfängeroptik als Überlagerung mit der Frequenz f_D registriert wird (6.13). [vgl. 55, S.205ff]

$$f_D = f_1 - f_2 = f_0 \sqrt{\frac{c + v_{PS}}{c - v_{PS}}} - f_0 \sqrt{\frac{c - v_{PS}}{c + v_{PS}}} = \dots = v_P \cdot \frac{2 \cdot \sin(\varphi)}{\lambda} \quad [\text{vgl. 55, S.208}] \quad (6.13)$$

Die Laser-surface-velocimetrie benötigt ebenso wie die 2D-Kreuzkorrelation und optische Komplettsysteme einen definierten Nennabstand. Die Genauigkeit leidet allerdings innerhalb des Messvolumens (fast) nicht und liegt in einem Bereich von etwa 0,05 % des Messwertes. Die üblichen Tiefen des Messvolumens erreichen bis zu 200 mm. Außerhalb des Messvolumens ist aber keine Messung möglich. Dies würde den potentiellen Einsatz für eine Trennvorrichtung deutlich einschränken, wie bereits in Kapitel 6.1.5 dargelegt. Zusätzlich besitzen diese Sensoren üblicherweise Laser der Klasse 3 und stellen daher eine erhebliche Gefahrenquelle im Sinne des Arbeitnehmerschutzes dar. Der Messbereich der Geschwindigkeit hängt vom Nennabstand ab und liegt in einem Bereich von einigen $\frac{mm}{s}$ bis über 250 $\frac{m}{s}$.



(a) Funktionsprinzip [vgl. 56]

(b) Beispiel Laser-surface-velocimeter [57]

Abbildung 6.4: Darstellung des Prinzips der Laser-surface-velocimetrie und Laser-surface-velocimeter

6.2 SENSOREN ZUR OBJEKTERKENNUNG UND POSITIONSBESTIMMUNG

Dieses Kapitel beschreibt die Funktionsweise verschiedener Sensoren, die für die Objekterkennung und Positionsbestimmung (Schraubenkupplung, Lösezug) in Frage kommen. Die geforderte Genauigkeit für die Kupplungsposition liegt bei $\leq \pm 0,05 \text{ m}$ (siehe Kapitel 4.3.2).

6.2.1 TIME-OF-FLIGHT KAMERA

Time-of-Flight (ToF) Kameras (Abbildung 6.6) basieren zu einem Großteil auf dem Pulslaufzeitverfahren und liefern dreidimensionale Aufnahmen der Umgebung. Das Pulslaufzeitverfahren wird dazu verwendet, die Entfernung zwischen dem Sensor und einem Objekt zu bestimmen. Ein Sensor setzt sich aus Sender und Empfänger zusammen und kann auf verschiedenen Sensortechnologien wie Ultraschall oder optischen Verfahren basieren. Bei einer Messung sendet der Sender einen Impuls, der von einem Objekt reflektiert und vom Empfänger detektiert wird (Abbildung 6.5).

Anhand der zeitlichen Verschiebung zwischen Senden und Empfangen ist es möglich, die Entfernung zum Objekt zu berechnen (6.14). Dieses Messprinzip wird unter anderem sowohl in ToF-Kameras als auch in Laserscannern eingesetzt.

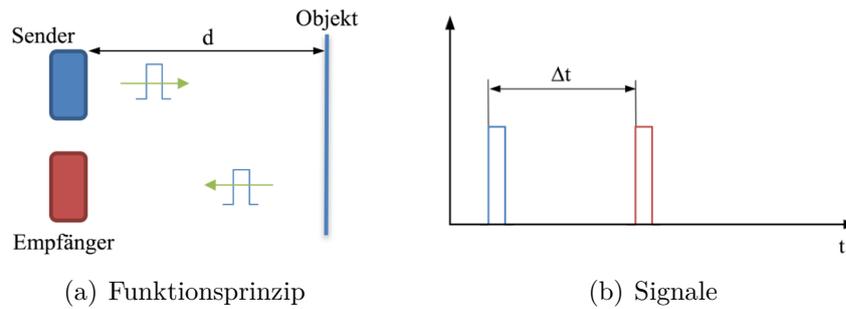


Abbildung 6.5: Graphische Darstellung der Funktionsweise des Pulslaufzeitverfahrens

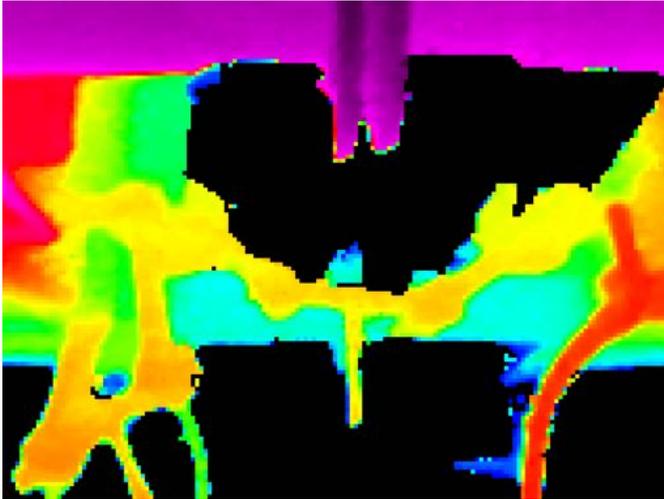
$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n} \quad (6.14)$$

d ...Distanz zum Objekt c ...Ausbreitungsgeschwindigkeit n ...Brechungsindex (Luft : $n = 1$)

Die Auflösung der Entfernung wird im Wesentlichen nur von der Messung der Zeit bestimmt. Diese muss bei optischen Verfahren, entsprechend der Geschwindigkeit des Lichts, sehr exakt bestimmt werden (veranschaulicht in (6.15)). Die Auflösung solcher Sensoren liegt üblicherweise im Bereich von mm bis cm. Entscheidender Faktor für die Reichweite einer Messung ist die zurückgestrahlte Lichtintensität und somit die Sendeleistung sowie auch der Reflexionsgrad des Objektes. Es können Reichweiten von mehreren 100 m erzielt werden. [vgl. 53, S.171]

$$\text{Lichtgeschwindigkeit} \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \Rightarrow 1 \text{ mm} \hat{=} 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad (6.15)$$

Im Fall der ToF-Kamera erfolgt die Laufzeitmessung für jedes einzelne Pixel, wodurch ein dreidimensionales Bild (Tiefenbild) entsteht (Abbildung 6.6). Die Besonderheit liegt darin, dass nicht pro Pixel ein einzelner schmaler Lichtstrahl, sondern ein breiter Lichtstrahl (fast ausschließlich mit Led im Infrarotbereich und Laserklasse 1) für alle Pixel gemeinsam ausgesendet wird, dessen Reflexionen von den einzelnen Pixeln erfasst werden. Im Vergleich zu Farb- und Graustufenkameras besitzen ToF-Kameras deutlich niedrigere Auflösungen im Bereich von circa QQVGA bis VGA (160x120 / 640x480). Es können Entfernungen ab mehreren Dezimetern und bis zu 60 m bis 100 m gemessen werden, bei bis zu 60 Bildern pro Sekunde. Der Vorteil eines Tiefenbildes liegt in der Möglichkeit, bestimmte Bereiche (Entfernungen) zu segmentieren und den Hintergrund auszublenden. Auf diese Weise lässt sich zum Beispiel ausschließlich der Bereich der Schraubenkupplung betrachten (siehe Kapitel 7.2.3).



(a) Tiefenbild einer Schraubenkupplung (farblich dargestellt)



(b) Beispiel ToF-Kamera [58]

Abbildung 6.6: Tiefenbild einer ToF-Kamera und ToF-Kamera

Um die Schraubenkupplung und den Status (langgemacht oder nicht langgemacht) optimal zu erkennen, muss die ToF-Kamera seitlich neben dem Gleis, mit einem Abstand d_k von mindestens 1,645 m (Begrenzungslinie G1, siehe Abbildung 3.9) zur Gleismitte eingebaut werden. Aus diesen Vorgaben und den Eigenschaften der Kamera (horizontaler Sichtfeldwinkel α_s und horizontale Auflösung) lässt sich die geometrische Auflösung (Kupplungsposition) folgendermaßen berechnen:

$$\frac{d_k \cdot \alpha_s \cdot \pi}{\text{Kameraauflösung} \cdot 180^\circ} \quad (6.16)$$

Mit den Werten $d_k = 1,7 \text{ m}$, $\alpha_s = 45^\circ$ und einer Kameraauflösung (horizontal) von 160 Pixeln ergibt sich eine geometrische Auflösung von

$$\frac{1,7 \text{ m} \cdot 45^\circ \cdot \pi}{160 \cdot 180^\circ} = 0,008 \text{ m}$$

Somit kann bereits mit einer geringen horizontalen Kameraauflösung eine deutlich bessere geometrische Auflösung erreicht werden als gefordert ($\leq \pm 0,05 \text{ m}$).

6.2.2 LASERSCANNER

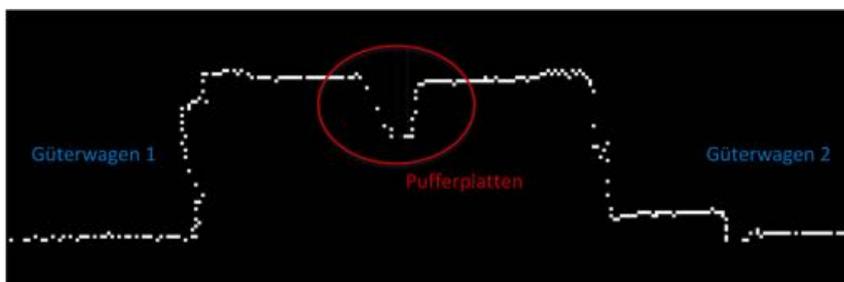
In Laserscannern (Abbildung 6.7) kommt ebenso wie bei ToF-Kameras das Pulslaufzeitverfahren zum Einsatz, allerdings in anderer Umsetzung. Hierbei sendet ein Laser einen Lichtstrahl aus, der reflektiert, detektiert und dessen Laufzeit gemessen wird. Danach findet eine minimale Umlenkung des Laserstrahls durch einen Spiegel statt und die Messung beginnt erneut. Üblicherweise rotiert dieser Spiegel, eine Messung des gesamten Sichtfeldes entspricht somit einer Umdrehung. Auf diese Weise entsteht eine mehrdimensionale Aufnahme der Umgebung (Abbildung 6.7).

Es existieren sowohl Einebenen- als auch Mehrebenen-Laserscanner mit einer Auflösung von bis zu $0,08^\circ$ (in Spezialbereichen können auch Auflösungen von weniger als $0,002^\circ$ erzielt werden). Bevorzugt sollen Sensoren zum Einsatz kommen, die Laser im Infrarotbereich und Laserklasse 1 verwenden.

Mit (6.16) lässt sich prinzipiell auch die geometrische Auflösung (Kupplungsposition) von Laserscannern bestimmen (6.17). So ergibt sich bereits bei einer Winkelauflösung von $0,5^\circ$ und einer Entfernung von $1,7\text{ m}$ eine deutlich bessere Auflösung als gefordert ($\leq \pm 0,05\text{ m}$).

$$\frac{d_k \cdot \alpha_s \cdot \pi}{180^\circ} = \frac{1,7\text{ m} \cdot 0,5^\circ \cdot \pi}{180^\circ} = 0,015\text{ m} \quad (6.17)$$

Durch die geringe Anzahl an Ebenen erscheint eine direkte Positionsbestimmung der Schraubenkupplung auf Basis der Daten eines Laserscanners sehr schwierig. Sofern es sich um einen geraden Gleisabschnitt handelt befindet sich allerdings die Position des Pufferplattenstoßes in der gleichen Ebene wie die Kupplungsmitte. Dieser Stoß lässt sich durch die charakteristische Geometrie bereits mit den Daten eines Einebenen-Laserscanners detektieren (siehe Abbildung 6.7).



(a) 1-Ebenen-Scan von Güterwagen, Sicht von Oben



(b) Beispiel Laserscanner [59]

Abbildung 6.7: Aufnahme eines Laserscanners und Laserscanner

6.3 SENSOREN FÜR DIE ERMITTLUNG DER TRENNSTELLEN

Mögliche Sensoren für die Ermittlung der Trennstellen überschneiden sich mit den potentiellen Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung, Objekterkennung und Positionsbestimmung vollständig. Aufgrund dessen erfolgt in Kapitel 6.4 keine explizite Betrachtung der Ermittlung der Trennstellen, da primär bestehende Sensoren aus den anderen Bereichen eingesetzt und die daraus gewonnenen Daten genutzt werden sollen. Trennstellen lassen sich je nach eingesetzter Sensorik durch Achszählung, Zählung der Schraubenkupplungen, Erkennung der Wagennummer et cetera ermitteln.

6.4 BEWERTUNG DER SENSOREN

In den folgenden Tabellen 6.1 bis 6.3 ist ein Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren aufgelistet:

Geschwindigkeitsmessung		
Sensor	Vorteile	Nachteile
Lichtschanke	<ul style="list-style-type: none"> • Kostengünstig • Einfache Installation und Auswertung • Hohe Messwertauflösung erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Messwertaktrate • Mögliche Messwertverfälschungen durch Personen et cetera
Radsensor	<ul style="list-style-type: none"> • Robust • Bewährte Technik • Einfache Auswertung • Hohe Messwertauflösung erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Messwertaktrate
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Bewährte Technik • Hohe Messwertaktrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Messwertverfälschungen durch Personen et cetera • Keine Richtungserkennung (Radarlux) • Teuer
Laserdistanzsensor (1DKK)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Messwertauflösung erreichbar • Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitnehmerschutz • Aufwändige Datenauswertung • Mögliche Messwertverfälschungen durch Personen et cetera
Farb- & Graustufenkameras (2DKK)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Messwertaktrate • Hohe Messwertauflösung erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingeschränkter Messbereich • Aufwändige Datenauswertung • Mögliche Messwertverfälschungen durch Personen et cetera
Optische Komplettsysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Bewährte Technik • Hohe Messwertaktrate • Keine Datenauswertung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingeschränkter Messbereich • Mögliche Messwertverfälschungen durch Personen et cetera

Tabelle 6.1: Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung (Teil 1)

Geschwindigkeitsmessung		
Sensor	Vorteile	Nachteile
Laser-surface-velocimeter	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Messwertaufösung • Hohe Messwertaktrate • Robust • Keine Datenauswertung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitnehmerschutz • Eingeschränkter Messbereich

Tabelle 6.2: Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung (Teil 2)

Objekterkennung und Positionsbestimmung		
Sensor	Vorteile	Nachteile
ToF-Kamera	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefenaufnahme (Segmentierung / Hintergrundausblendung) • Beleuchtungsunabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Sensoraufösung • Teuer • Eventuell Messwertverfälschungen durch Sonneneinstrahlung
Laserscanner	<ul style="list-style-type: none"> • Großer Messbereich • Beleuchtungsunabhängig • Tiefenaufnahme (Segmentierung / Hintergrundausblendung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wenig Messebenen • Teuer • Eventuell Messwertverfälschungen durch Sonneneinstrahlung
Farb- & Graustufenkameras	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Sensoraufösung 	<ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtungsabhängig • Eventuell Messwertverfälschungen durch Sonneneinstrahlung • keine Hintergrundausblendung

Tabelle 6.3: Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung

Basierend auf der Richtlinie VDI 2225 werden die einzelnen Sensoren nach ausgewählten Kriterien ohne Gewichtung bewertet (Tabelle 6.5 und 6.6). Anstatt einer Aufteilung zwischen technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit findet eine gemeinsame Bewertung statt. Es werden wiederum 0 bis 4 Punkte je Kriterium vergeben. Die Gesamtsumme des jeweiligen Sensors, dividiert durch die Höchstpunktzahl ergibt die Wertigkeit (0 bis 1). Quantifizierbare Kriterien werden anhand der Wertskala in Tabelle 6.4 bewertet.

Wertskala					
Kriterium	4	3	2	1	0
Anschaffungskosten [€]	< 500	500 - 2000	2000 - 4000	4000 - 8000	> 8000
Messwertaktrate [$\frac{\text{Messwerte}}{\text{s}}$]	> 40	40 - 20	20 - 10	10 - 2	< 2
Messwertaufösung [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	< 0,001	0,001 - 0,005	0,005 - 0,02	0,02 - 0,1	> 0,1
Sensoraufösung [$\frac{\text{° des Sichtfeldes}}{\text{Pixel}}$]	< 0,02	0,02 - 0,05	0,05 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5

Tabelle 6.4: Wertskala der quantifizierbaren Bewertungskriterien

Geschwindigkeitsmessung							
Kriterien	Lichtschranke	Radsensor	Radar	Laserdistanzsensor	Farb- & Graustufenkamera	Optische Komplettsysteme	Laser-surface-velocimeter
Einfache Auswertung	3	3	3	1	1	4	4
Robustheit	1	4	4	3	2	2	4
Arbeitnehmerschutz	4 (Laserklasse 1)	4	4	2 (Laserklasse 2)	4	4	0 (Laserklasse 3)
Messwertaktrate	0	0	4	1	4	4	4
Keine Messbereichseinschränkungen	4	4	4	4	0	0	0
Messwertauflösung	4	4	3	4	4	3	4
Anschaffungskosten	4	3	1	3	3	1	1
Summe	20	22	23	18	18	18	17
Wertigkeit $W = \frac{\text{Summe}}{28}$	0,71	0,79	0,82	0,64	0,64	0,64	0,61

Tabelle 6.5: Bewertung der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung

Aufgrund der erforderlichen Genauigkeit und um Redundanzen zu schaffen, sollen mehrere Sensoren zum Einsatz kommen. Hierfür müssen in weiterer Folge die in Frage kommenden Sensoren in Verbindung mit geeigneten Algorithmen getestet werden (siehe Kapitel 7). Basierend auf den ermittelten Wertigkeiten erscheinen Radsensor und Radar am besten geeignet. Zusätzlich gilt es noch weitere mögliche Alternativen auf ihre Einsatzfähigkeit hin zu untersuchen. Im Besonderen sollen Laserdistanzsensoren sowie Farb- und Graustufenkameras als kostengünstige Alternative näher betrachtet werden. Laser-surface-velocimeter scheiden aufgrund der geringen Wertigkeit und speziell wegen der eingesetzten Laserklasse 3 aus. Optische Komplettsysteme scheiden aufgrund der Verschlechterung der Ergebnisse bei veränderlichem Abstand zum Messobjekt (siehe Kapitel 6.1.5), der eingeschränkten Messfeldtiefe und der hohen Kosten aus. Bei einem Einsatz von Lichtschranken ist zu erwarten, dass diese eine vergleichbare Datenmenge wie Radsensoren liefern, aber anfälliger für Störungen sind. Daher wird der Einsatz von Radsensoren bevorzugt.

Objekterkennung und Positionsbestimmung			
Kriterien	ToF-Kamera	Laserscanner	Farb- & Graustufenkamera
Einfache Auswertung	2	2	1
Robustheit	4	4	2
Arbeitnehmerschutz	4	4	4
Messwerttaktrate	4	4	4
Sichtfeld	2	4	2
Sensorauflösung	1	2	4
Hintergrundaussblendung	4	4	0
Anschaffungskosten	1	2	3
Summe	22	26	20
Wertigkeit $W = \frac{\text{Summe}}{32}$	0,69	0,81	0,63

Tabelle 6.6: Bewertung der Sensoren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung

Basierend auf den ermittelten Wertigkeiten soll die Einsatzmöglichkeit eines Laserscanners genauer untersucht und mittels geeigneter Software getestet werden. Die Einsatztauglichkeit von ToF-Kamera, Farb- und Graustufenkamera erscheint grundsätzlich gegeben und wird im Hinblick auf die Schaffung von Redundanzen ebenfalls näher untersucht (Kapitel 7). Keiner der Sensoren liefert ohne aufwändigere Algorithmen Positionsdaten. Die Vorteile der Tiefenaufnahmen (ToF-Kamera, Laserscanner) liegen insbesondere in der Möglichkeit der Ausblendung des Hintergrundes und der Beleuchtungsunabhängigkeit. Im Gegensatz dazu können Farb- und Graustufenkameras hohe Auflösungen aufweisen und sind in der Anschaffung wesentlich günstiger.

7 ALGORITHMEN UND METHODEN FÜR DIE DATENAUSWERTUNG

Für die ausgewählten Sensoren aus Kapitel 6 werden in diesem Kapitel verschiedene Möglichkeiten zur Datenauswertung aufgezeigt. Im Weiteren erfolgt die Betrachtung der Kombination (Fusionierung) der Daten sowie die Referenzierung der Sensoren zur Trennvorrichtung. Die Referenzierung ist notwendig, um eine Verbindung zwischen den ermittelten Positionen und der Position der Trennvorrichtung herzustellen.

7.1 GESCHWINDIGKEITSBESTIMMUNG

Im Folgenden werden verschiedene Algorithmen aufgezeigt, mit denen sich die Geschwindigkeit der Güterwagen bestimmen lässt.

7.1.1 EINDIMENSIONALE KREUZKORRELATION

Liegen zwei ähnliche zeitlich verschobene Signale $x(t)$, $y(t)$ vor (Abbildung 7.1), so kann anhand der Kreuzkorrelation die zeitliche Verschiebung Δt bestimmt werden. Die Kreuzkorrelationsfunktion ψ (KKF) weist also ein Maximum an der Stelle $\tau = \Delta t$ auf. [vgl. 60, S.86] Die KKF kann für zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale folgendermaßen berechnet werden:

$$\text{zeitkontinuierlich :} \quad \psi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad [60, \text{S.86}] \quad (7.1)$$

$$\text{zeitdiskret :} \quad \psi_{xy}(k) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot M + 1} \cdot \sum_{v=-M}^M x(v) \cdot y(v + k) \quad [60, \text{S.86}] \quad (7.2)$$

T ...Zeitintervall das korreliert werden soll τ ...Verschiebung x/y ...Signale

M ...Anzahl der Messpunkte die korreliert werden sollen k ...Verschiebung (in Messpunkten)

Die Berechnung der KKF in (7.1) und (7.2) ist nicht normiert. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse, Festlegung von allgemeinen Schwellwerten et cetera ist daher (fast) nicht möglich. Dies lässt sich durch die Anwendung der normierten Kreuzkorrelation erreichen (7.3). Zusätzlich werden bei der normierten KKF die Mittelwerte der Signale (\bar{x} , \bar{y}) abgezogen um etwaige Offsets (Mittelwertverschiebungen) zu kompensieren. Für die praktische Umsetzung wird die KKF im Folgenden nur mehr zeitdiskret betrachtet.

$$\text{normiert : } \psi_{xy}(k) = \frac{\sum_{v=1}^M (x_v - \bar{x})(y_{v+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{v=1}^M (x_v - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{v=1}^M (y_{v+k} - \bar{y})^2}} \quad [61] \quad (7.3)$$

N ...Länge des Messausschnittes $k = \{0, 1, \dots, N - M\}$

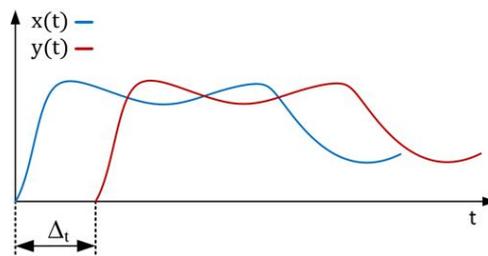


Abbildung 7.1: Zwei um Δt versetzte ähnliche Signale

Zur Ermittlung der Zuggeschwindigkeit (entspricht der Kupplungsgeschwindigkeit) werden drei Laserdistanzsensoren seitlich neben dem Gleis (siehe Abbildung 7.2) mit Blickrichtung zu den Güterwagen positioniert. Dabei werden die Sensoren in unterschiedlich definierten Abständen (s_1 , s_2) zueinander platziert. Durch diese Anordnung ergeben sich an allen Sensorausgängen dieselben Signale (Abbildung 7.3), mit einem zeitlichen Versatz. Der Versatz dieser Signale kann durch die KKF bestimmt und anhand der bekannten Daten (Geometrie, Abtastrate,...) in eine Geschwindigkeit umgerechnet werden.

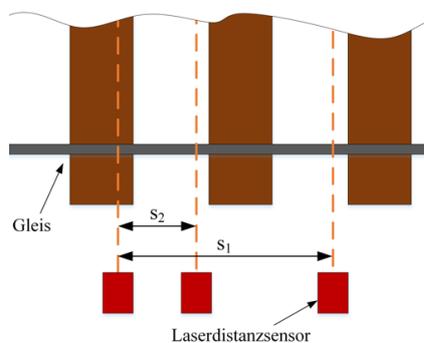


Abbildung 7.2: Anordnung der Laserdistanzsensoren

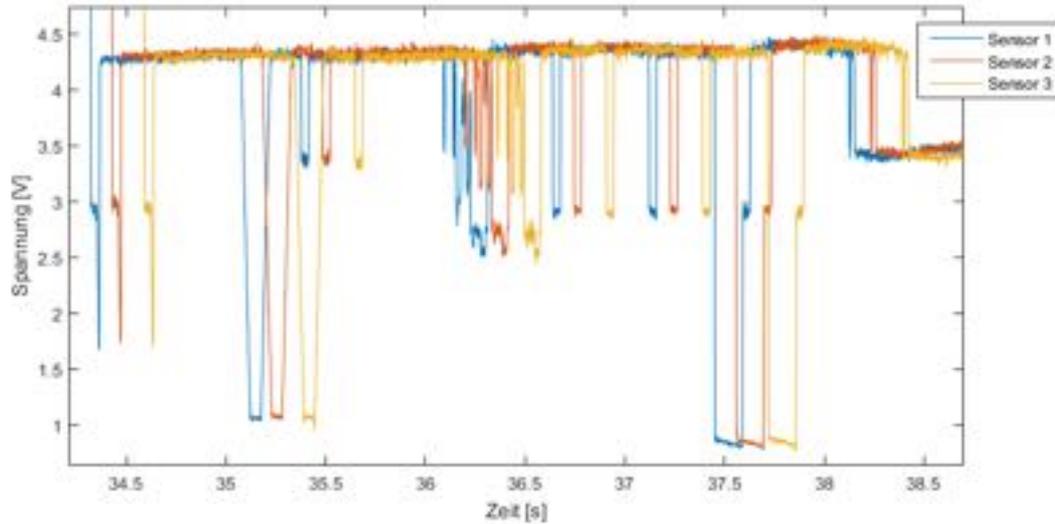


Abbildung 7.3: Signale einer Messung mit Laserdistanzsensoren (Zuggeschwindigkeit zirka $2 \frac{m}{s}$)

Die Berechnung des notwendigen Abstandes zwischen den Sensoren erfolgt analog zu den Berechnungen in Kapitel 6.1.1 mit denselben Parameterwerten:

$$sm = 128 \quad \Delta t = 128 \text{ ms} \quad f_S = 1 \text{ kHz} \quad f_D = 3 \text{ kHz} \quad v_{Zug} = 2,5 \frac{m}{s}$$

$$s_1 = v_{Zug} \cdot \Delta t = 2,5 \frac{m}{s} \cdot 0,128 \text{ s} = 0,32 \text{ m}$$

Damit bei niedrigen Geschwindigkeiten Δt relativ gering bleibt, wird für $v_{Zug} \leq 1 \frac{m}{s}$ ein eigener Messabschnitt festgelegt:

$$sm = \frac{v_{Zug} \cdot 1,33}{\Delta v} = \frac{1 \frac{m}{s} \cdot 1,33}{0,026 \frac{m}{s}} = 52 \quad \Rightarrow \quad \Delta t = 52 \cdot \frac{1}{f_S} = 52 \text{ ms}$$

$$s_2 = v_{Zug} \cdot \Delta t = 1 \frac{m}{s} \cdot 0,052 \text{ s} = 0,052 \text{ m}$$

Diese Wahl ermöglicht es zeitnah und mit möglichst geringer Zeitspanne Ergebnisse mit der geforderten Fehlertoleranz $\pm 0,026 \frac{m}{s}$ zu erhalten. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der minimal zu messenden Geschwindigkeit von $0,1 \frac{m}{s}$ (7.4). So wird bei s_1 die Geschwindigkeit durch die lange Zeitspanne von $3,2 \text{ s}$ (7.4) sehr stark gemittelt, wodurch ruckartige Geschwindigkeitsveränderungen zu spät oder gar nicht erkennbar sind.

$$\Delta t_1 = \frac{s_1}{0,1 \frac{m}{s}} = 3,2 \text{ s} \quad \Delta t_2 = \frac{s_2}{0,1 \frac{m}{s}} = 0,52 \text{ s} \quad (7.4)$$

Der Zeitaufwand für die Berechnung der Kreuzkorrelation in dieser Art und Weise hängt im Wesentlichen von der Länge des Messausschnittes (N) und der Anzahl der Sensormesswerte die korreliert werden (M) ab. Somit ist letztlich die Abtastrate der Datenerfassung sowie die minimal messbare und maximal zulässige Geschwindigkeit von entscheidender Bedeutung. Konkret ergibt sich eine sinnvolle Wahl von N anhand der Anzahl an Sensormesswerten bei der Maximalgeschwindigkeit ($128 \cdot \frac{f_D}{f_s} = 384$) plus M plus einen wählbaren Bereich (legt den detektierbaren Geschwindigkeitsbereich fest). Als Maximalwert gilt $N_{max} = \Delta t_1 \cdot f_D + M$. Je größer M gewählt wird, desto aussagekräftiger ist die Korrelation, es bedeutet aber auch eine höhere Datenmenge und Rechenzeit. Anhand von Versuchen zeigte sich, dass die Wahl von $M = 600$ gute Ergebnisse erzielt.

Korrelationen sollen möglichst frühzeitig erkannt werden, weshalb zu Beginn N relativ klein gewählt wird ($N_{start} = 384 + M = 384 + 600 = 984$). Befindet sich keine signifikante Korrelation ($\psi_{xy} < 0,85$) in den Sensormesswerten, so werden diese so lange um neue ergänzt, bis entweder $N_{max} = 3,2 s \cdot 3.000 Hz + 600 = 10.200$ erreicht ist oder eine signifikante Korrelation auftritt. Entscheidend ist, dass Messausschnitte mit nicht aussagekräftigen Signalen ($\sigma \leq 0,003$) verworfen werden, um falsche Korrelationen zu vermeiden.

Die Anzahl an Rechenoperationen bei erstmaliger Berechnung von ψ_{xy} eines Messausschnittes beträgt $\approx 14 \cdot M = 8.400$. Bei jeder weiteren Berechnung müssen gleichbleibende Elemente wie \bar{x} nicht erneut berechnet werden, was die notwendigen Rechenoperationen auf $\approx 10 \cdot M = 6.000$ reduziert. Die maximale Anzahl an Rechenoperation für einen Messausschnitt beträgt daher $8.400 + 6.000 \cdot (N_{max} - N_{start}) = 8.400 + 6.000 \cdot 9216 = 55.304.400$ und erfordert eine entsprechend hohe Rechenleistung.

In Abbildung 7.4 sind die errechneten Geschwindigkeiten aus den Kreuzkorrelationen einer Messung visualisiert. Darin kann der Verlauf der Geschwindigkeit sehr gut erkannt werden. Die geringfügigen Streuungen lassen sich im Zuge einer Sensorfusion automatisch filtern. Im Vergleich zu den Signalen des Radars und der händischen Auswertung der Geschwindigkeit zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung. Allerdings ist die Messwerttaktrate sehr gering und von der Geschwindigkeit des Zuges abhängig (bei $2 \frac{m}{s}$ im Mittel zwei Ergebnisse pro Sekunde je Sensorpaar, siehe Abbildung 7.3). Durch die geringe Messwerttaktrate, die Rechenintensität und Bedenken bezüglich des Arbeitnehmerschutzes (Laserklasse 2) von Seiten ÖBB wird auf den Einsatz von Laserdistanzsensoren verzichtet.

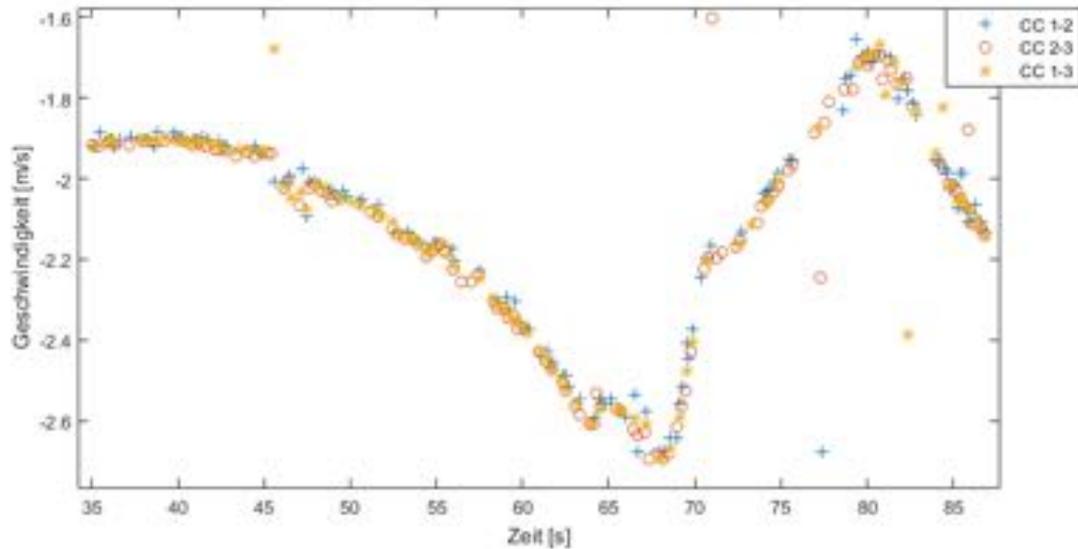


Abbildung 7.4: Ergebnis der eindimensionalen Kreuzkorrelation

CC...Kreuzkorrelation der jeweiligen Sensoren

7.1.2 ZWEIDIMENSIONALE KREUZKORRELATION

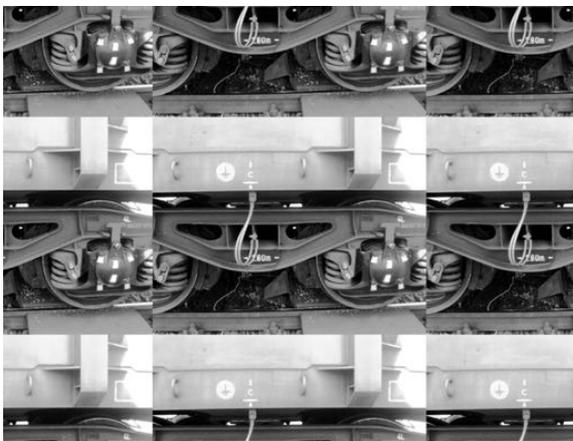
Die Kreuzkorrelation lässt sich nicht nur auf eindimensionale Signale, sondern abgewandelt auch auf zweidimensionale Signale (Bilder) anwenden. Damit die zweidimensionale Kreuzkorrelation nicht stark von Intensitätsänderungen im Zielbild abhängt, kann die normierte Kreuzkorrelation $C_N(x,y)$ in (7.5) eingesetzt werden. Diese Gleichung wird im Besonderen für Template Matching (Mustererkennung) in Intensitäts- oder Grauwertbildern eingesetzt, um Ähnlichkeiten zwischen dem verschobenen Referenzbild R und dem überdeckten Ausschnitt des Zielbildes I zu finden. Für die Berechnung wird das Referenzbild mit einem Offset (x,y) über das Zielbild verschoben, mit dem Koordinatenursprung als Referenzpunkt. Für die Bestimmung der Zuggeschwindigkeit kann auf ein Verschieben in Y-Richtung verzichtet werden ($y = 0$). [vgl. 62, S.598ff]

$$C_N(x,y) = \frac{\sum_{(i,j) \in R} I(x+i, y+j) \cdot R(i,j)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in R} I^2(x+i, y+j)} \cdot \sqrt{\sum_{(i,j) \in R} R^2(i,j)}} \quad [\text{vgl. 62, S.601}] \quad (7.5)$$

Sofern Ziel- und Referenzbild ausschließlich positive Werte aufweisen, ist $C_N(x,y)$ immer im Bereich von 0 bis 1 ($C_N(x,y) = 1$ entspricht einer maximalen Übereinstimmung bei einem Offset von (x,y)). Somit bietet die normierte Kreuzkorrelation den zusätzlichen Vorteil, dass sie direkt den Grad der Übereinstimmung liefert. [vgl. 62, S.601]

Gleichung (7.5) hat den Nachteil, dass sie bei großen Zielbildern und Referenzbildern sehr rechenintensiv ist. So liegt bei einem Zielbild der Größe $M \times M$ und einem Referenzbild mit $N \times N$ die Anzahl an erforderlichen Operationen in der Größenordnung von $M^2 N^2$. Im Gegensatz dazu lässt sich die Transformation in den Spektralraum und zurück (Fast Fourier Transformation, FFT) mit $\mathcal{O}(M \log_2 M)$ Operationen durchführen. Die Multiplikation im Spektralraum erfordert dann nur M^2 Operationen. Der Rechenaufwand ist daher im Wesentlichen nicht mehr von der Größe des Referenzbildes abhängig. Dies wird durch die Faltungseigenschaft der Fouriertransformation möglich, sie besagt, dass eine lineare Faltung im Ortsraum einer punktweisen Multiplikation im Spektralraum entspricht. [vgl. 62, S.531f]

Die zweidimensionale Fouriertransformation nimmt Signale in jeder Koordinatenrichtung als periodisch an, somit gehören die Bildübergänge an den Rändern ebenso wie jeder Bildinhalt zum Signal (siehe Abbildung 7.5). Dieser Umstand führt bei großen Intensitätsunterschieden an gegenüberliegenden Randpunkten zu abrupten Übergängen und kann signalrelevante Komponenten völlig überdecken. Die Auswirkung von markanten Übergängen in Abbildung 7.5 (a) sind an der hellen vertikalen und horizontalen Linie durch die Bildmitte in Abbildung 7.6 (a) erkennbar, die in Abbildung 7.6 (b) deutlich schwächer vorhanden sind. [vgl. 62, S.520f]

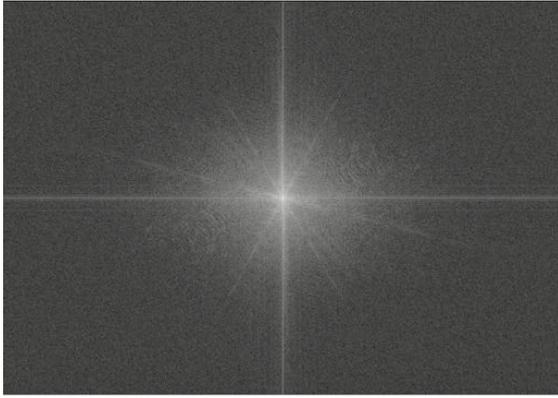


(a) Periodisches Bildsignal

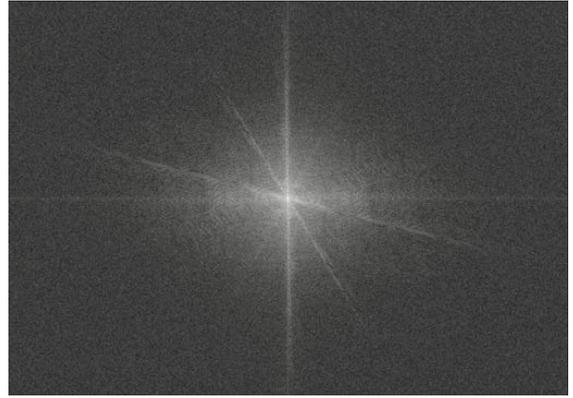
(b) Ergebnis nach Anwendung der Fensterfunktion (Gauß, $\sigma = 0,5$)

Abbildung 7.5: Bild eines vorbeifahrenden Güterwagens

Durch eine Multiplikation des Referenz- und Zielbildes mit einer geeigneten Fensterfunktion (windowing function) $w(u,v)$ lässt sich dieses Problem lösen. Die Fensterfunktion soll an den Bildrändern kontinuierlich auf null abfallen und so Diskontinuitäten an den Übergängen beseitigen (siehe Abbildung 7.5). [vgl. 62, S.520f]



(a) Spektrum des Originalbilds



(b) Spektrum nach Anwendung der Fensterfunktion

Abbildung 7.6: Spektrum des Originalbilds und nach Anwendung der Fensterfunktion (Gauß, $\sigma = 0,5$)

Als Basis für die zweidimensionale Kreuzkorrelation dienen zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen einer Graustufenkamera, die seitlich neben dem Gleis installiert wurde. Somit ist sowohl das Referenzbild R als auch das Zielbild I eine Aufnahme der Graustufenkamera mit identischer Bildgröße. Aus diesen Aufnahmen lässt sich der Versatz (x,y) ermitteln und anhand der zeitlichen Differenz der Aufnahmen, der Daten der Kamera (Pixelgröße, Brennweite,...) und des Abstandes zum Güterwagen in eine Geschwindigkeit umrechnen (siehe Kapitel 6.1.5). In Abbildung 7.7 sind die Ergebnisse der Berechnung dargestellt (Anmerkung: der Zug bewegte sich während dieser Aufnahme annähernd mit konstanter Geschwindigkeit).

Daten der Messung (siehe Kapitel 6.1.5):

$$px_{size} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad b_s = 0,006 \text{ m} \quad d_{obj} = 1,85 \text{ m} \quad \Delta t = 0,02 \text{ s}$$

Messwertauflösung:

$$\frac{px_{size} \cdot \left(\frac{d_{obj}}{b_s} - 1\right)}{\Delta t} = \frac{4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \left(\frac{1,85 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} - 1\right)}{0,02 \text{ s}} = 0,074 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7.6)$$

Anhand der ermittelten Geschwindigkeiten in Abbildung 7.7 kann man sehr starke Schwankungen der relativ konstanten Zuggeschwindigkeit erkennen. Dies lässt sich mitunter auf die verschiedenen Abstände der Güterwagenelemente zur Kamera zurückführen. Besonders der Abstand im unteren Bildbereich variiert deutlich. Als nächster Schritt wurde daher der untere Bildbereich ausgeblendet und die Geschwindigkeit nur anhand des restlichen Bildbereichs ermittelt (siehe Abbildung 7.8).

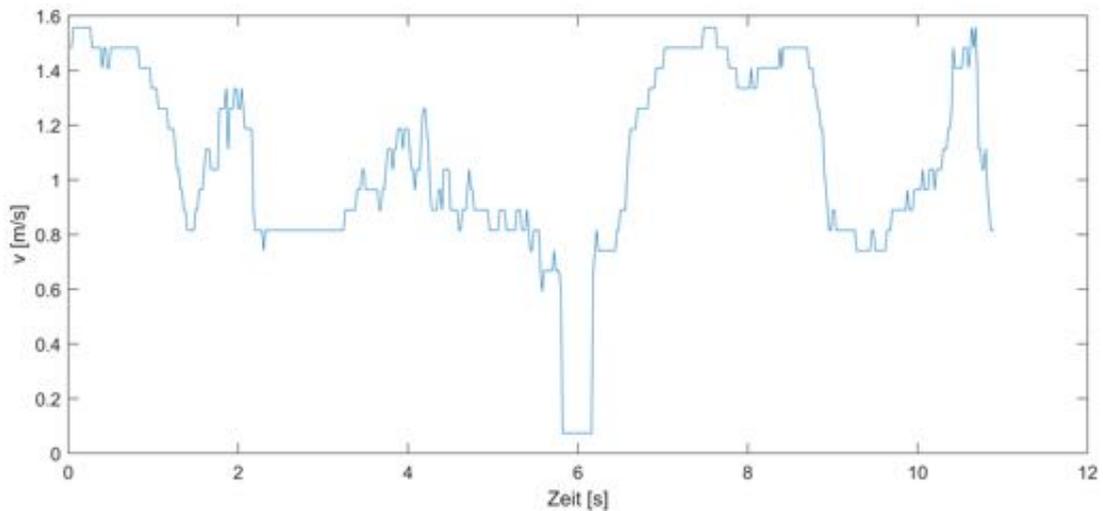
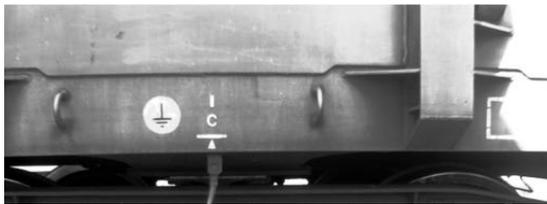


Abbildung 7.7: Ergebnis der zweidimensionalen Kreuzkorrelation



(a) Ausgangsbild

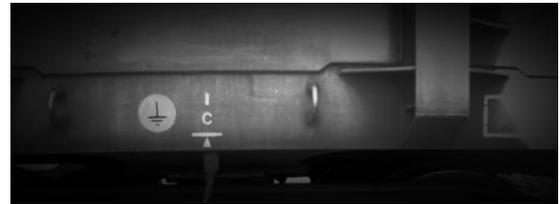
(b) Ergebnis nach Anwendung der Fensterfunktion (Gauß, $\sigma = 0,5$)

Abbildung 7.8: Ausschnitt der Aufnahme in Abbildung 7.6

Die Ergebnisse in Abbildung 7.9 zeigen eine deutliche Verbesserung zu Abbildung 7.7. So erscheint dieses Resultat wesentlich plausibler. In beiden Abbildungen ist die berechnete Auflösung von $0,074 \frac{m}{s}$ (7.6) deutlich erkennbar. Die Auflösung kann durch Veränderungen der Parameter (d_{obj} , Δt) oder Wahl einer anderen Kamera wesentlich beeinflusst werden.

Besonders auffällig sind die Einbrüche bei 6 s und 9 s in Abbildung 7.9, deren Ursache anhand des Vergleichs mit den Aufnahmen identifiziert werden konnte. Dabei handelt es sich um deutliche Veränderungen des Bildbereiches (zum Beispiel wird anstatt einer Aussenwand eines Güterwagens der Kupplungsbereich erfasst), was zu einem Sprung der Distanz zwischen Objekt und Kamera führt und die Berechnung der Geschwindigkeit stark verfälscht. Eine Bestimmung des tatsächlichen Abstands anhand der Graustufenbilder ist nicht möglich.

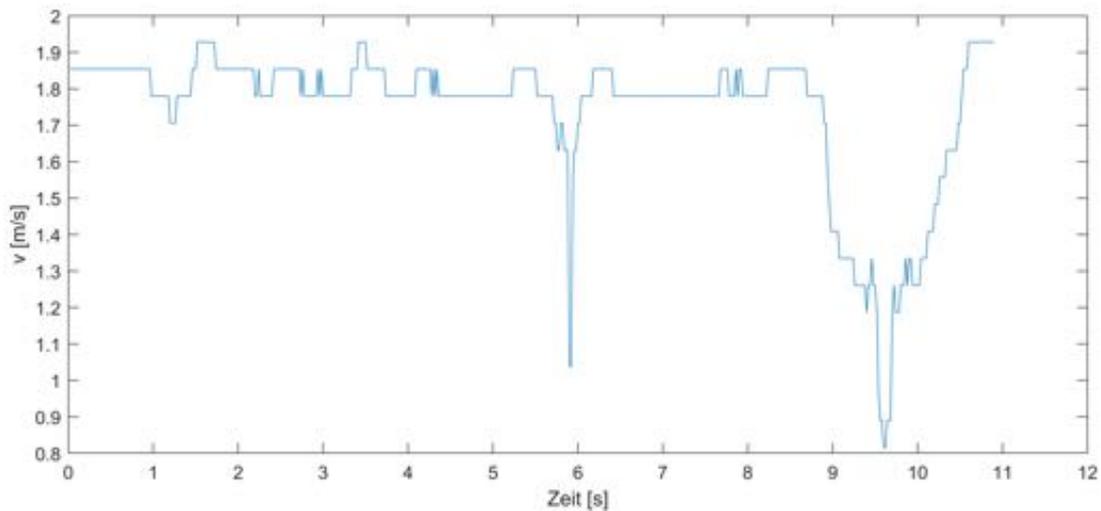


Abbildung 7.9: Ergebnis der zweidimensionalen Kreuzkorrelation, optimiert

Durch den variierenden Abstand der Objekte (unterschiedliche Güterwagenbreite, hervorstehende Wagenteile, Kupplungsbereich,...) treten häufig starke Sprünge in der ermittelten Geschwindigkeit auf, die einen Einsatz für die automatische Trennvorrichtung durch die unbekanntes Abstandsänderungen unmöglich machen. Daher wurde auf weitere Versuche zur Verbesserung der Resultate verzichtet.

7.1.3 RADSSENSOR

Die Auswertung der Daten von Radsensoren ist relativ einfach, so ist nur eine Detektion der Signalfanken erforderlich. Anhand der Zeitspanne zwischen den Flanken und dem Abstand zwischen den Sensoren kann daraus die Geschwindigkeit der Güterwagen berechnet werden (siehe auch Kapitel 6.1.1).

Radsensoren können durch die geringe Anzahl an Messwerten nur als Referenz zu anderen Sensoren dienen, da abhängig von der Achszahl der Güterwagen zwei bis sechs Messwerte (Geschwindigkeit) je Güterwagen entstehen. Ein Einsatz bietet sich daher hauptsächlich für das Zählen der Achsen und die Richtungsbestimmung an.

7.1.4 RADAR

Bei der Auswertung der Signale des Radargeräts der Firma Radarlux muss nur die aktuelle Frequenz des Rechtecksignals bestimmt werden. Aus der ermittelten Frequenz lässt sich mit einem Umrechnungsfaktor ($160,8 \frac{\text{Hz} \cdot \text{s}}{\text{m}}$) direkt die Geschwindigkeit berechnen (siehe Abbildung 7.10).

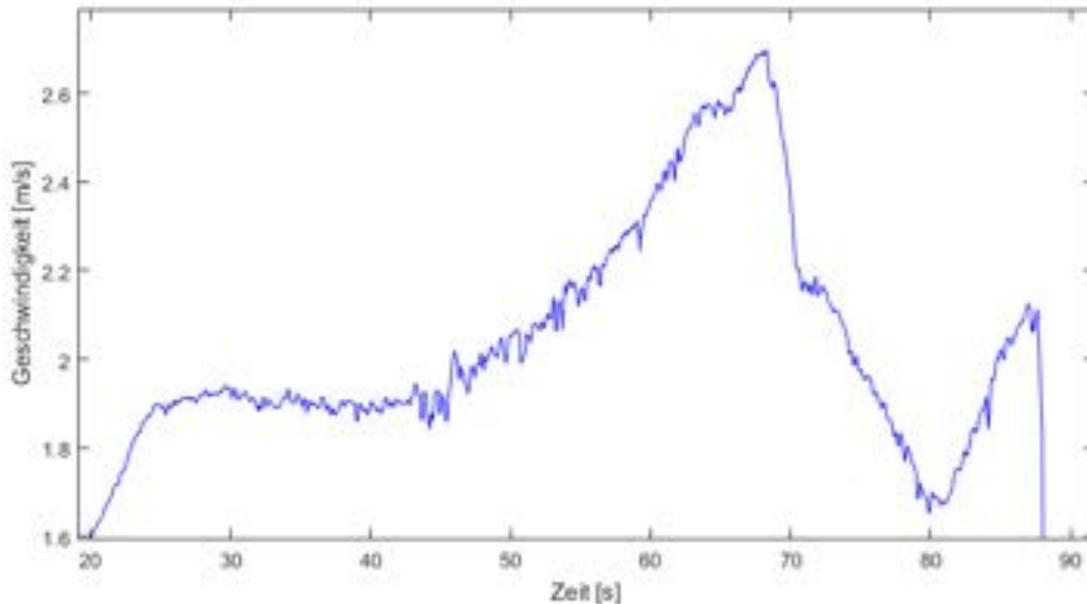


Abbildung 7.10: Ermittelte Geschwindigkeit einer Radarmessung

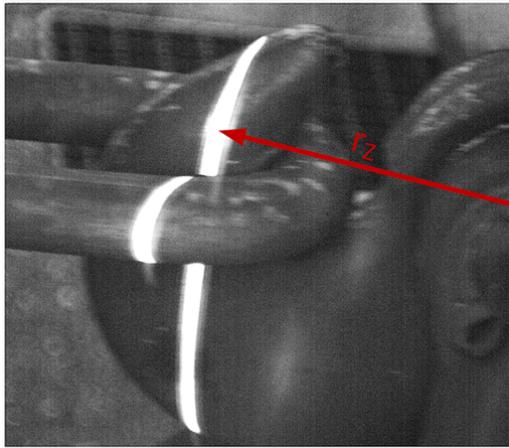
In Abbildung 7.10 ist der Verlauf der Geschwindigkeit deutlich zu erkennen. Ebenso sind ein überlagertes Rauschen sowie kleinere „Einbrüche“ (zirca $0,07 \frac{m}{s}$) erkennbar. Der Vorteil der Messung ist die hohe Messwertakttrate. Bei dem Umrechnungsfaktor von $160,8 \frac{Hz}{m}$ ergeben sich zum Beispiel bei $2 \frac{m}{s}$ 320 Messwerte. Ein Nachteil ist die Richtungsunabhängigkeit der Messwerte, daher muss die Fahrtrichtung des Zuges durch andere Sensoren (zum Beispiel Radsensor) ermittelt werden.

7.2 OBJEKTERKENNUNG UND POSITIONSBESTIMMUNG

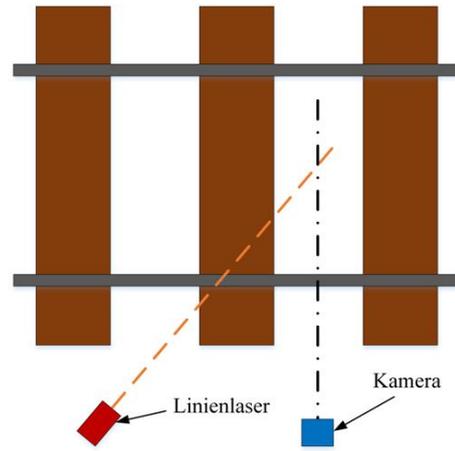
Dieses Kapitel befasst sich mit Algorithmen, die unter anderem in der Lage sind, die Schraubenkupplung zu erkennen und die Position der Schraubenkupplung zu bestimmen.

7.2.1 LICHTSCHNITTVERFAHREN

Für den Einsatz des Lichtschnittverfahrens wird seitlich neben dem Gleis ein Linienlaser vertikal positioniert. Der Laser muss in möglichst spitzem Winkel zum Gleis eine vertikale Linie auf den Zughaken projizieren. Durch die Krümmung des Zughakens erscheint die Linie bei einem zum Gleis normalen Betrachtungswinkel gebogen (siehe Abbildung 7.11). Diese gebogene Linie ist mit ihrem Kreisradius r_Z sehr charakteristisch für den Zughaken und lässt sich daher für die Positionsbestimmung einsetzen.



(a) Aufnahme eines Zughakens mit Linienlaser



(b) Aufbau Lichtschnittverfahren

Abbildung 7.11: Lichtschnittverfahren

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist, dass nur die Position des Zughakens und nicht die der Kupplungsmitte ermittelt wird. Des Weiteren ist der Bereich, innerhalb dessen die Position für eine Trennstelle detektierbar ist, sehr begrenzt (zirka 5 bis 10 cm). Durch die direkte Sonneneinstrahlung ist der Einsatz von Lasern mit Laserklasse 3 notwendig, was aber im direkten Widerspruch zum Arbeitnehmerschutz steht. Aufgrund der Summe der Nachteile wird auf einen Einsatz des Lichtschnittverfahrens verzichtet.

7.2.2 KLASSISCHE METHODEN DER BILDERKENNUNG

Die klassischen Methoden der Bilderkennung basieren unter anderem auf Kantendetektion, Morphologie, Segmentierung (Schwellwerte, Region Growing, Hough-Transformation,...) und Bildvergleich (Template Matching, Lucas-Kanade-Verfahren,...). Der Einsatz dieser Verfahren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung anhand von Farb- oder Graustufenbildern wurde in Diskussionen mit Experten für nicht zweckmäßig und als zu wenig robust befunden. So sprechen folgende Gegebenheiten gegen einen Einsatz:

- Direkte Sonneneinstrahlung
- Umweltbedingungen (Regen, Schnee,...)
- Unterschiedliches Aussehen der Trennstellen (Kupplungsschwengelart und -position, Kupplungsdurchhang, Anordnung der Bremsschläuche,...)
- Relativ ähnliche Farben der Objekte und der Umgebung (braun, grau)
- Kein neutraler Hintergrund

7.2.3 NEURONALE NETZE

„(Künstliche) neuronale Netze (engl. *artificial neural networks*) sind informationsverarbeitende Systeme, deren Struktur und Funktionsweise dem Nervensystem und speziell dem Gehirn von Tieren und Menschen nachempfunden sind. Sie bestehen aus einer großen Anzahl einfacher, parallel arbeitender Einheiten, den sogenannten Neuronen. Diese Neuronen senden sich Informationen (z.B. über äußere Stimuli) in Form von Aktivierungssignalen über gerichtete Verbindungen zu.“ [63, S.7]

Neuronen werden in neuronalen Netzen zum Beispiel durch Schwellenwertelemente (auch McCulloch-Pitts-Neuronen oder Perzeptron) modelliert (siehe Abbildung 7.12). Sie sind Verarbeitungseinheiten für reelle Zahlen mit n Eingängen (x_1, \dots, x_n) und einem Ausgang y . Der Verarbeitungseinheit ist ein Schwellenwert θ und jedem Eingang x_i ein Gewicht w_i zugeordnet. [vgl. 63, S.13]

Der Ausgang y wird folgendermaßen berechnet:

$$y = \begin{cases} 1, & \text{falls } \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \geq \theta \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

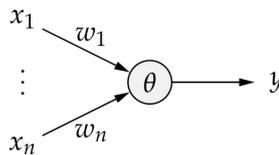


Abbildung 7.12: Darstellung Schwellenwertelement

Die Ausdrucksmächtigkeit von Schwellenwertelementen ist stark eingeschränkt. So können nur linear separable Funktionen dargestellt werden, also Funktionen deren Punkte sich durch Geraden, Ebenen oder Hyperebenen trennen lassen. Durch Zusammenschalten von mehreren Schwellenwertelementen zu Netzen (siehe Abbildung 7.13) kann die Berechnungsfähigkeit deutlich erhöht werden [vgl. 63, S.18].

Die allgemeine Struktur von neuronalen Netzen setzt sich aus mehreren Schichten zusammen. Diese Schichten bestehen aus Eingabeneuronen U_{in} (Eingabe aus der Umgebung), Ausgabeneuronen U_{out} (Ausgabe an die Umgebung) oder versteckten Neuronen U_{hidden} (kein Kontakt mit Umgebung), dargestellt in Abbildung 7.13.

„Zu den interessantesten Eigenschaften (künstlicher) neuronaler Netze gehört die Möglichkeit, sie mit Hilfe von Beispieldaten für bestimmte Aufgaben zu trainieren. [...] Das Training eines neuronalen Netzes besteht in der Anpassung der Verbindungsgewichte und ggf. weiterer Parameter, wie z.B. Schwellenwerten, so dass ein bestimmtes Kriterium optimiert wird. Je nach der Art der Trainingsdaten und dem zu optimierenden Kriterium unterscheidet man zwei Arten von Lernaufgaben: feste und freie.“ [63, S.40]

- Bei festen Lernaufgaben soll das neuronale Netz zu vorgegebenen Eingängen vorgegebene Ausgänge liefern
- Bei freien Lernaufgaben wird das neuronale Netz so trainiert, dass es zu ähnlichen Eingaben ähnliche Ausgaben liefert

[vgl. 63, S.40f]

Der Aufbau von neuronalen Netzen (Verbindung der Neuronen, Anzahl der Schichten,...) und das Lernen (Training) kann nach verschiedenen Schemata erfolgen, nachfolgend einige Beispiele:

- Mehrschichtige Perzeptren (siehe Abbildung 7.13)
- Radiale-Basisfunktionen-Netze
- Hopfield-Netze
- Autoencoder
- Convolutional Neural Networks (CNN's)

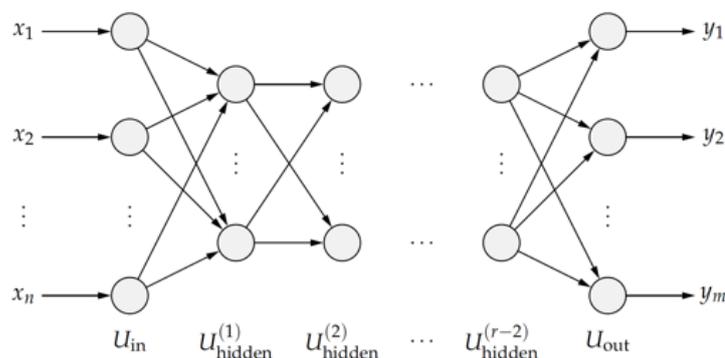


Abbildung 7.13: Allgemeiner Aufbau eines r -schichtigen Perzeptrons [63, S.44]

Für die Untersuchung und Anwendung von neuronalen Netzen auf die Daten von ToF-Kamera und Laserscanner wurde das Programm Matlab eingesetzt. Mit dieser Software erfolgte die Aufbereitung aufgenommener Daten, das Training verschiedener Netze und die Live-Auswertung für den Trennprozess. Folgende Aufgaben müssen die neuronalen Netze erfüllen:

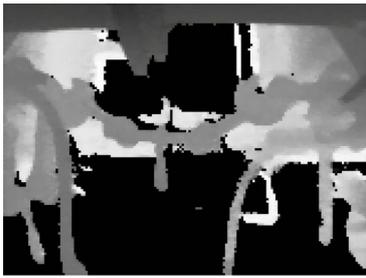
- Erkennen der Schraubenkupplung
- Erkennen welche der beiden Schraubenkupplungen eingehängt ist
- Erkennen ob die Schraubenkupplung langgemacht ist
- Positionsbestimmung der Schraubenkupplung

Nachfolgend wird nur die Suche nach einem geeigneten neuronalen Netz für die Erkennung der Schraubenkupplung auf Basis der Aufnahmen der ToF-Kamera aufgezeigt. Für die weiteren Aufgaben erfolgte die Suche nach dem selben Schema.

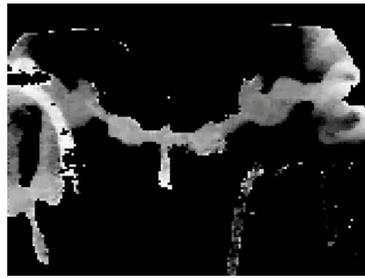
Um neuronale Netze mit den Aufnahmen der ToF-Kamera trainieren zu können, müssen diese zuerst geeignet aufbereitet werden. So müssen die Messdaten skaliert werden. Üblicherweise erfolgt auch eine sinnvolle Reduktion der Bildgröße, um Rechenzeit zu sparen (siehe Tabelle 7.1). Anhand der Daten in Tabelle 7.1 zeigt sich deutlich, dass sich die Pixelanzahl stark auf die benötigte Trainingszeit sowie auf die Rechenzeit für eine Bildauswertung auswirkt. Ebenso zeigt sich die Tendenz, dass die Steigerung der Neuronenanzahl mit einer Erhöhung der Rechenzeit verbunden ist. Mit allen Bildauflösungen lassen sich vergleichbare niedrige Fehleranteile erzielen, weshalb im Sinne einer möglichst kurzen Rechenzeit, die Auflösung in weiterer Folge auf ein Viertel reduziert wird (entspricht $\frac{1}{16}$ der ursprünglichen Pixelanzahl). Weiters sind folgende Bildaufbereitungen denkbar:

- (a) Originalinhalt der ToF-Aufnahmen ohne segmentierten Bereichen
- (b) Segmentierter Kupplungsbereich (nur Werte im Bereich: Entfernung zur Schraubenkupplung $\pm 0,2 m$)
- (c) Binärbild von (b)

Das Labeln (Klassieren) der Bilder ist ein weiterer notwendiger Schritt. Entsprechend der Aufgabenstellung erfolgt zuerst eine Klassifizierung. Im Fall der Erkennung der Schraubenkupplung gibt es zwei Klassen (Schraubenkupplung, keine Schraubenkupplung). Alle Bilder müssen händisch der richtigen Klasse zugeordnet werden.



(a) Tiefenwerte in Graustufen dargestellt



(b) Segmentierung der Schraubenkupplung



(c) Binärbild der Schraubenkupplung

Abbildung 7.14: Aufbereitete Aufnahme der ToF-Kamera für die neuronalen Netze (Volle Auflösung)

Auswirkungen der Auflösungsreduktion												
	Volle Bildauflösung				Halbe Bildauflösung				Viertel Bildauflösung			
Anzahl Neuronen	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
Fehleranteil [%]	11,5	1,4	3,5	14,1	5,3	1,1	3,0	2,1	5,7	3,0	2,3	3,1
Trainingszeit [min]	124	123	124	131	16	18	20	23	3	4	4	6
Rechenzeit für eine Bildauswertung [ms]	20	29	35	42	11	12	13	16	8	9	9	11

Tabelle 7.1: Auswirkungen der Auflösungsreduktion auf die neuronalen Netze (Intel Core i5 2,7 GHz / Autoencoder / Bildaufbereitung (a) / 5618 Trainingsbilder)

Innerhalb von mehreren Schleifen wurden im ersten Schritt jeweils aufgenommene und gelabelte Daten der ToF-Kamera (5618 Einzelbilder) nach (a), (b) oder (c) aufbereitet (siehe Abbildung 7.14) und die Auflösung auf ein Viertel reduziert. Danach fand ein Training mit verschiedenen in Matlab verfügbaren Netzen (Autoencoder, Patternnet, Cascadeforwardnet, Feedforwardnet, Convolutional Neural Network - CNN) statt. Dabei wurde bei jedem Schleifendurchgang die Anzahl an Schichten und Neuronen variiert. Im Anschluss fand eine Überprüfung der trainierten Netze mit einem Testdatensatz (Aufnahmen der ToF-Kamera die den Netzen unbekannt sind, 3236 Einzelbilder) statt, bei dem der Anteil an Fehldetektionen als Qualitätskriterium abgespeichert wurde (siehe Tabelle 7.2 und 7.3). Auf diese Weise konnten die Auswirkungen der unterschiedlichen Bildaufbereitung, Neuronen- und Schichtenanzahl sowie der verschiedenen Netze aufgezeigt werden.

Alle neuronalen Netze wurden mit 10 bis 90 Neuronen in der ersten U_{hidden} -Schicht und mit 0 bis 80 Neuronen in der zweiten U_{hidden} -Schicht trainiert. Die Anzahl der Neuronen der zweiten Schicht wurde immer kleiner als die der ersten Schicht gewählt, da jede Schicht zu einer Komprimierung der Bilddaten auf wesentliche Bildinhalte führt (Anmerkung: gilt für Autoencoder). Die Schrittgröße von 10 Neuronen zwischen den einzelnen Netzen hat sich als ausreichend gezeigt.

Fehleranteil Autoencoder bei Bildaufbereitung (a)									
Anzahl Neuronen 1. Schicht	Anzahl Neuronen 2. Schicht								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
10	5,7%	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3,0%	2,8%	-	-	-	-	-	-	-
30	2,3%	5,9%	0,6%	-	-	-	-	-	-
40	3,1%	12,4%	13,0%	10,5%	-	-	-	-	-
50	4,0%	10,5%	10,8%	13,0%	9,4%	-	-	-	-
60	2,3%	11,4%	10,8%	9,8%	9,8%	2,0%	-	-	-
70	0,9%	11,2%	10,4%	9,0%	9,7%	10,3%	8,3%	-	-
80	1,7%	6,6%	1,2%	0,7%	1,7%	0,8%	0,4%	1,4%	-
90	1,4%	10,9%	8,3%	4,8%	4,6%	3,9%	1,7%	1,9%	1,6%

Tabelle 7.2: Fehleranteil Autoencoder, Bildaufbereitung (a)

An den Resultaten in Tabelle 7.2 ist deutlich ersichtlich, dass mehrere Kombinationen sehr gute Ergebnisse liefern, wobei eine Kombination jeweils einer bestimmten Anzahl an Neuronen in der ersten und der zweiten Schicht entspricht. So liegt der Fehleranteil bei 14 Kombinationen $\leq 2\%$ und der Bestwert bei $0,4\%$ mit 80 Neuronen in der ersten und 60 Neuronen in der zweiten Schicht. Dass eine zweite Schicht nicht gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Ergebnisse ist, wird an den Einträgen in Tabelle 7.2 deutlich. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die zweite Schicht in diesen Fällen wahrscheinlich zu wenige Neuronen besitzt um die Daten der ersten Schicht ausreichend zu verarbeiten. Grundsätzlich ergeben sich durch die Wahl der Startgewichte der Neuronen mitunter leicht unterschiedliche Ergebnisse. Um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten wurden die Startgewichte immer gleich gewählt.

Alle neuronalen Netze mit einem Fehleranteil im niedrigen einstelligen Prozentbereich sind potentiell für den Einsatz zur Erkennung der Schraubenkupplung geeignet. In Tabelle 7.3 sind zusammenfassend die jeweiligen Bestwerte der Fehleranteile der weiteren Netze und Bildaufbereitungen aufgelistet.

Bestwerte der neuronalen Netze									
Bildaufbereitung	Autoencoder		Patternnet		Cascadeforwardnet		Feedforwardnet		CNN
	Neuronen	Fehler	Neuronen	Fehler	Neuronen	Fehler	Neuronen	Fehler	Fehler
(a)	[80, 60]	0,4%	[70, 0]	0,0%	[10, 10]	32,7%	[50, 10]	0,0%	0,0%
(b)	[90, 0]	0,0%	[50, 30]	0,0%	[10, 10]	9,6%	[90, 10]	0,3%	-
(c)	[80, 0]	0,0%	[80, 40]	0,0%	[10, 0]	5,9%	[80, 10]	0,0%	-

Tabelle 7.3: Vergleich der Fehleranteile der verschiedenen neuronalen Netze

Rechenzeiten der Netze					
	Autoencoder	Patternnet	Cascadeforwardnet	Feedforwardnet	CNN
Rechenzeit	12ms	8ms	14ms	12ms	50ms

Tabelle 7.4: Vergleich der Rechenzeit der unterschiedlichen Netze für die Auswertung eines Bilds (Intel Core i5 2,7 GHz)

Die Ergebnisse in Tabelle 7.3 zeigen deutlich, dass mit Hilfe von neuronalen Netzen die Schraubenkupplung sehr gut detektierbar ist. Lediglich das Cascadeforwardnet eignet sich aufgrund der hohen Fehlerrate für diese Aufgabe nicht. Ebenso wird deutlich, dass die getesteten Arten der Bildaufbereitung praktisch keinen Einfluss auf die Erkennbarkeit der Schraubenkupplung haben. Daher ist die Erkennung der Schraubenkupplung mit neuronalen Netzen sehr robust und eignet sich sehr gut für den Einsatz für die automatische Trennvorrichtung. Unterschiede bei den einzelnen neuronalen Netzen bestehen zum Beispiel bei der Rechenzeit für die Auswertung eines Bildes, mit einem Bestwert von 8 ms des Patternnet. So liefert zwar das CNN auch ausgezeichnete Ergebnisse, benötigt allerdings im Vergleich zu den anderen Netzen die vierfache Rechenzeit (siehe Tabelle 7.4). Aus diesem Grund wird der Einsatz eines CNN's nicht empfohlen.

7.3 SENSORFUSION

7.3.1 DAS KALMAN FILTER

Die einzelnen Sensoren für die Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung, liefern unabhängig von einander, je nach Sensor, zuverlässigere oder weniger zuverlässige Daten. Für einen repräsentativen Systemzustand müssen diese Daten geeignet verknüpft (fusioniert) werden. Dies kann auf Basis eines Kalman Filters erfolgen. „Im Jahre 1960 entwickelte Rudolf E. Kalman für zeitdiskrete, lineare Systeme ein spezielles Filter, mit dem es möglich war, aus verrauschten und teils redundanten Messungen die Zustände und Parameter des Systems zu schätzen. Der Vorteil dieses (Kalman-)Filters gegenüber anderen stochastischen Schätzverfahren ist der iterative Aufbau des Filters, der besonders für Echtzeitanwendungen geeignet ist.“ [64, S.3] Das Kalman Filter hilft dabei, Unsicherheiten (Fehler) zu reduzieren und kann Schätzungen zu nicht messbaren Größen liefern, sofern das System durch ein geeignetes mathematisches Modell beschrieben werden kann (Bewegungsgleichungen,...) und bestimmte Randbedingungen gelten.

In Tabelle 7.5 sind die einzelnen Bezeichnungen und in Tabelle 7.6 die Grundgleichungen des Kalman Filters aufgelistet. Die zugehörige Visualisierung der Struktur des Filters ist in Abbildung 7.15 dargestellt.

P ...Kovarianzmatrix des Schätzfehlers
H ...Messempfindlichkeitsmatrix, die die lineare Beziehung zwischen dem Zustand des dynamischen Systems und die möglichen Messungen definiert
\bar{K} ...Kalman Verstärkungsmatrix
Q ...Kovarianzmatrix des Systemrauschens
R ...Kovarianzmatrix des Messrauschens
I ...Einheitsmatrix
x ...Zustandsvektor eines linearen dynamischen Systems
z ...Vektor (oder Skalar) der Messwerte
Φ ...Zustandsübergangsmatrix eines diskreten linearen dynamischen Systems

Tabelle 7.5: Bezeichnung der Parameter, nach [64] und [65]

Modellgleichungen	
Dynamisches Systemmodell	$x_k = \Phi_{k-1} \cdot x_{k-1} + w_{k-1}$ $w_k \sim N(0, Q_k)$
Messmodell	$z_k = H_k \cdot x_k + v_k$ $v_k \sim N(0, R_k)$
Grundgleichungen	
Prädiktion	
Zustandsschätzung-Extrapolation	$\hat{x}_k(-) = \Phi_{k-1} \cdot \hat{x}_{k-1}(+)$
Fehlerkovarianz-Extrapolation	$P_k(-) = \Phi_{k-1} \cdot P_{k-1}(+) \cdot \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}$
Korrektur	
Zustandsschätzung-Beobachtungsupdate	$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k \cdot [z_k - H_k \cdot \hat{x}_k(-)]$
Fehlerkovarianz-Update	$P_k(+) = [I - \bar{K}_k \cdot H_k] \cdot P_k(-)$
Kalman-Verstärkung	$\bar{K}_k = P_k(-) \cdot H_k^T \cdot [H_k \cdot P_k(-) \cdot H_k^T + R_k]^{-1}$

Tabelle 7.6: Gleichungen des Kalman-Filters, nach [64] und [65]

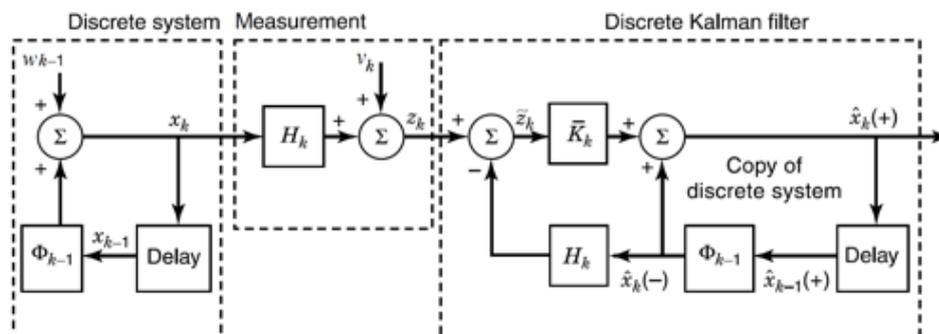


Abbildung 7.15: Blockdiagramm des Systems, Messmodells und des diskreten Kalman-Filters [65]

7.3.2 DAS KALMAN FILTER IM ENTKUPPLUNGSPROZESS

Für den Ablauf des Entkuppelns in einem geraden Gleisabschnitt ist nur eine eindimensionale Betrachtung notwendig. Somit werden nur Werte für x , \dot{x} und \ddot{x} des Zuges betrachtet, wobei nur eine Messung von x (Laserscanner, ToF-Kamera) und \dot{x} (Radar) stattfindet.

Besonderes Augenmerk muss bei der Fusionierung der Daten der verschiedenen Sensoren auf die unterschiedlichen Messwerttaktraten gelegt werden. Ansonsten kommt es zu einer Über- oder Untergewichtung vereinzelter Sensoren. Dies wird durch die Berechnung von (7.7) für jeden Sensor mit der jeweiligen Messwerttaktrate Δt_m berücksichtigt. Ebenso gilt es für jeden einzelnen Sensor die Beobachtungsunsicherheit R (Messunsicherheit) zu bestimmen. Q berücksichtigt etwaige „Störungen“ des Zuges und beschreibt, wie sich der Systemzustand von einem zum nächsten Schritt verändern kann (auftretende Beschleunigungen,...).

Entscheidend für das Filterverhalten ist das Verhältnis zwischen R und Q . Ist Q größer als R , so ist das Kalman Filter dynamisch, im umgekehrten Fall ist das Filter träge [vgl. 66]. Anhand von Versuchen zeigte sich, dass sich für den Entkuppelungsprozess die Wahl von $R \approx Q \cdot 10^6$ für x und $R \approx Q \cdot 10^2$ für \dot{x} sehr gut eignet (Anmerkung: ergibt sich aus (7.7)). Die Kovarianzmatrix P beschreibt wie sicher sich das Kalman Filter bezüglich des aktuellen Systemzustandes ist. Je niedriger die Werte sind, desto sicherer ist sich das Filter, dass der Systemzustand richtig ist. Anhand der Kalman-Verstärkung \bar{K} bestimmt das Kalman Filter, ob es den Messwerten oder der Systemdynamik mehr vertrauen soll [vgl. 66]. Für eine hohe zeitliche Auflösung des Systemzustandes kann das Kalman Filter mit einem höheren Takt arbeiten und zwischen den Messwerten den Systemzustand schätzen.

Q lässt sich folgendermaßen berechnen (gewählte Standardabweichung $\sigma_s = 0,5$) :

$$Q = \begin{bmatrix} 0,5 \cdot \Delta t_m^2 \\ \Delta t_m \\ 2 \cdot \sqrt{\Delta t_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,5 \cdot \Delta t_m^2 & \Delta t_m & 2 \cdot \sqrt{\Delta t_m} \end{bmatrix} \cdot \sigma_s^2 \quad [\text{vgl. 66}] \quad (7.7)$$

Für ein robustes System ist unter anderem eine Plausibilitätskontrolle der Sensordaten entscheidend. So müssen zum Beispiel ToF-Kamera und Laserscanner vor dem Start des Entkupplungsvorgangs vergleichbare Positionen ermitteln und eine langgemachte Schraubenkupplung detektieren. Zusätzlich kommt es bei Updates des Systemzustandes zu einer Berechnung der sich aus dem neuen Messwert und dem letzten Update ergebenden Beschleunigung. Liegt diese Beschleunigung über dem definierten Grenzwert, so erfolgt kein Update.

In den Abbildungen 7.16 und 7.17 ist ein Beispiel für eine Sensordatenfusion eines vorbeifahrenden Zuges dargestellt. Darin ist die ermittelte Position der Schraubenkupplung mittels Laserscanner ($posNN_{Laser}$) und ToF-Kamera ($posNN_{ToF}$) sowie die Messwerte des Radars (v_{Radar}) enthalten. Die Werte von x , v und a sind die fusionierten Ergebnisse des Kalman Filters (Systemzustand) und stellen die Position, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Schraubenkupplung dar. Die Plausibilitätsüberprüfung der Messwerte für $IstKupplung$ erfolgt ausserhalb der Sensorfusion. Für die Auswertung der Daten von Laserscanner und ToF-Kamera wurden jeweils neuronale Netze (siehe Kapitel 7.2.3) eingesetzt.

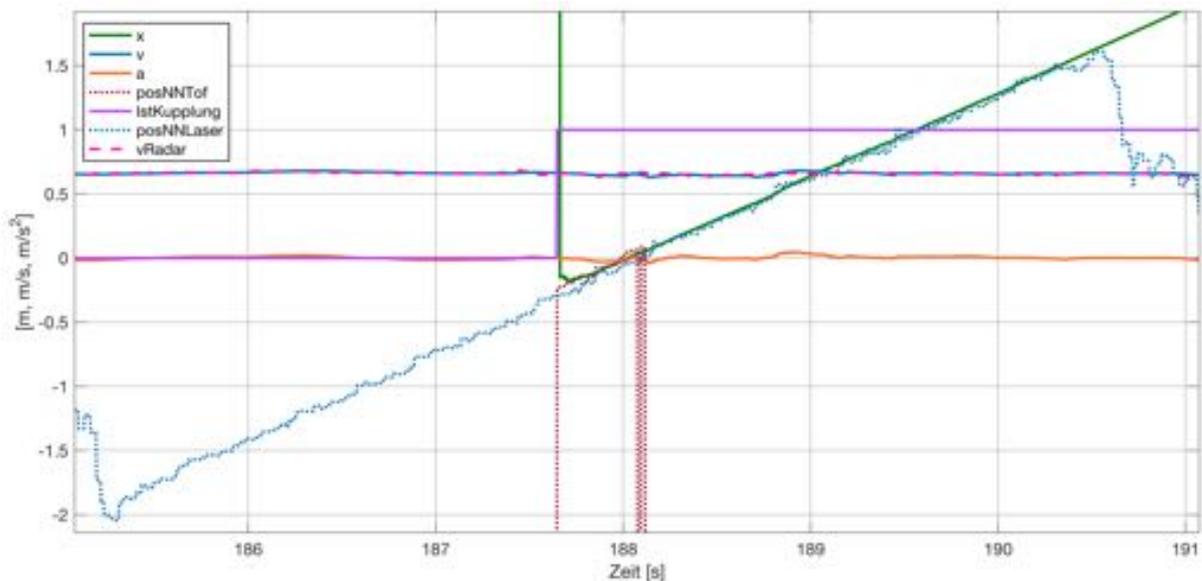


Abbildung 7.16: Verlauf der ermittelten Parameter und des Sensorfusionsergebnisses (x , v , a)

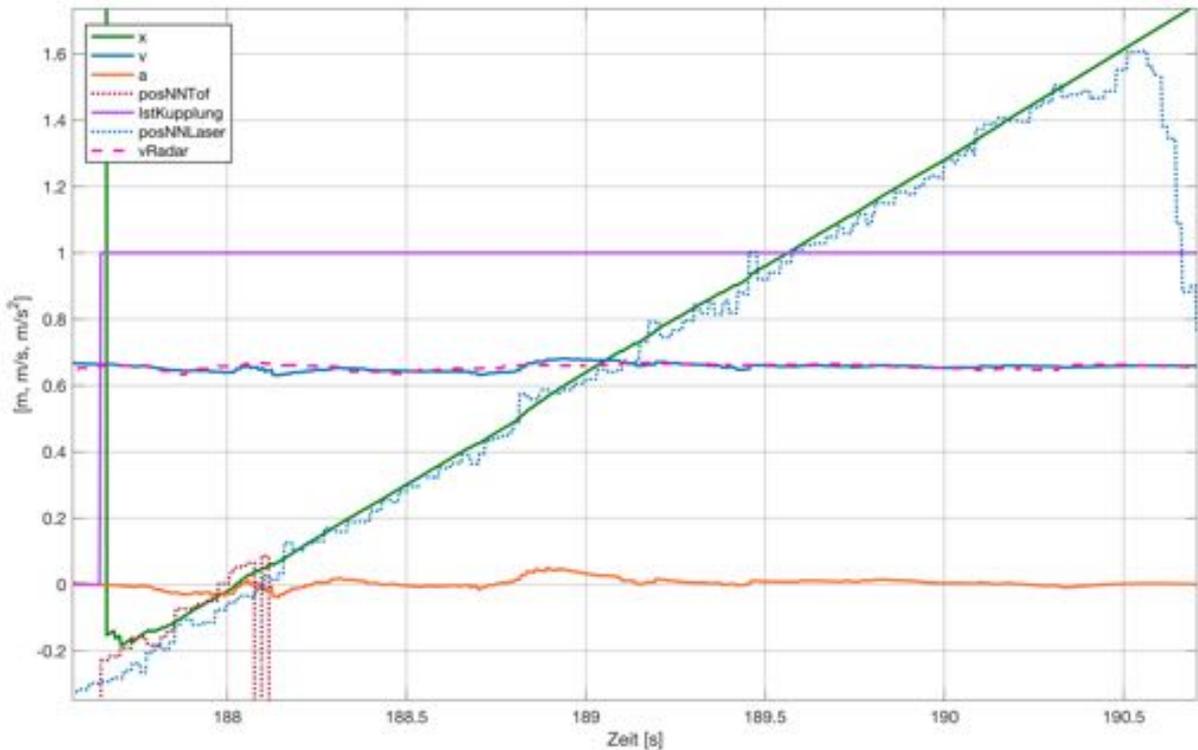
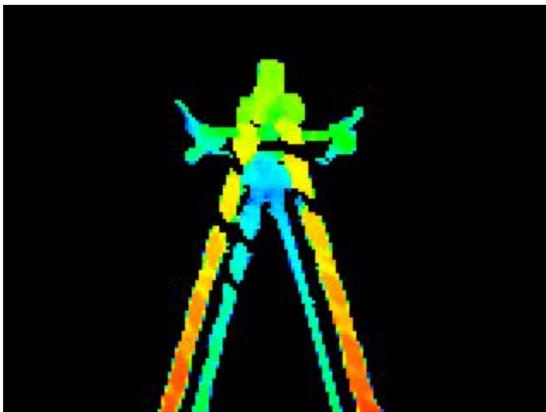


Abbildung 7.17: Detailausschnitt von Abbildung 7.16

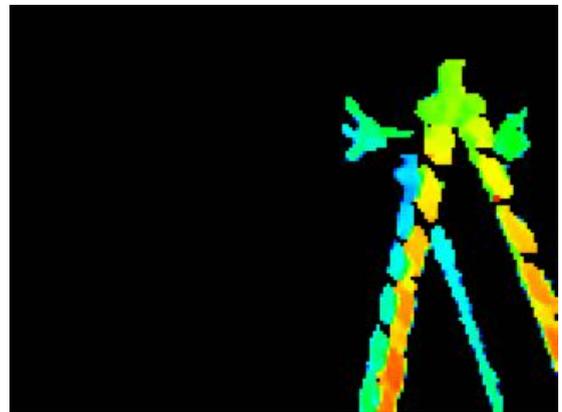
Anhand der Abbildungen 7.16 und 7.17 wird besonders der weite Erfassungsbereich (-2 m bis $1,5\text{ m}$) des Laserscanners (*posNNLaser*) deutlich. Die ToF-Kamera (*posNNTof*) liefert im Gegensatz dazu in einem wesentlich kleineren Bereich Positionsdaten ($-0,22\text{ m}$ bis $0,1\text{ m}$). Erst wenn sowohl Laserscanner als auch ToF-Kamera die Position der Schraubenkupplung bestimmt haben und die Schraubenkupplung als langgemacht detektiert wurde, erfolgt die Meldung *IstKupplung* und das Kalman Filter wird auf die aktuellen Positionswerte gesetzt. Anhand des Verlaufs von x ist die erhöhte Abtastrate und ein glatterer Verlauf im Vergleich zu den Positionsdaten erkennbar. Dies ist einer der wesentlichen Vorteile des Kalman Filters. Der nahezu deckungsgleiche Verlauf von v und $v\text{Radar}$ zeigt, dass die zugrunde liegende Geschwindigkeit der ermittelten Positionen gut mit der vom Radar ermittelten Geschwindigkeit übereinstimmt. Die Sensorfusion zeigt somit das gewünschte Verhalten und soll weiter eingesetzt werden.

7.4 SENSORREFERENZIERUNG

Um eine Verbindung zwischen der ermittelten Position der Schraubenkupplung und der Position der Trennvorrichtung herzustellen, müssen die Sensoren zur Trennvorrichtung referenziert werden. Eine Referenzierung kann auf verschiedene Art und Weise stattfinden, dabei wurde auf eine möglichst einfache Umsetzung Wert gelegt. Die entwickelte Methode kommt gänzlich ohne zusätzliche Hilfsmittel wie Kalibrierungsplatten oder Vermessung aus. Bei der entwickelten Methode wird der hochgefahrene Kniehebel mit seinen bekannten Abmessungen in den Aufnahmen der Sensoren erkannt. Durch den in der Tiefe versetzten (z_d) symmetrischen Aufbau (siehe Abbildung 7.19) entstehen perspektivische Verschiebungen (siehe Abbildung 7.18) in den Aufnahmen, anhand derer die Position und Orientierung eines Sensors berechnet werden kann.



(a) Mittige Positionierung



(b) Seitlich versetzte Positionierung

Abbildung 7.18: Aufnahmen des hochgeklappten Kniehebels, ToF-Kamera, Referenzierung

7.4.1 REFERENZIERUNG DER TOF-KAMERA

Im Folgenden sind die Berechnungen für die Bestimmung von Position und Orientierung der ToF-Kamera angeführt. Diese basieren auf den Skizzen in Abbildung 7.19 und 7.20. Die Referenzierung des Laserscanners erfolgt auf ähnliche Weise.

$\Delta_{\beta_{px}} \dots \Delta_{\beta}$ als Anzahl von Pixeln $\Delta_{\alpha_{px}} \dots \Delta_{\alpha}$ als Anzahl von Pixeln

α_K ... Öffnungswinkel des Sichtfeldes der Kamera

$x_{Resolution}$... Auflösung der Kamera in x – Richtung (horizontal)

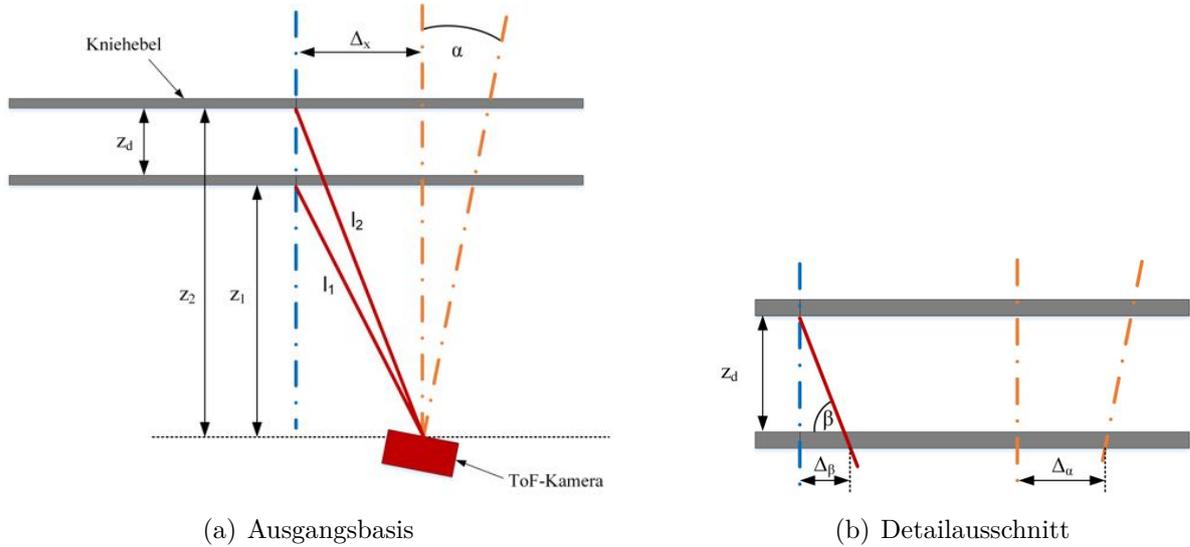


Abbildung 7.19: Skizze: Winkel- & Positionsbestimmung (Sicht von Oben), ToF-Kamera

Anhand des bekannten Sichtfeldwinkels der ToF-Kamera kann die Breite des Sichtfeldes bei jeder Entfernung zur Kamera berechnet werden. Teilt man diese Breite durch die Anzahl an Pixeln, so erhält man die Breite bp_x , die ein einzelnes Pixel bei der Entfernung l_1 repräsentiert. Dies stellt allerdings nur eine Näherung dar, tatsächlich müsste für eine konstante Pixelbreite der Abstand zur Kamera ebenfalls konstant bleiben. Dieser Fehler ist für die auftretenden niedrigen Werte von Δ_β und Δ_α allerdings minimal und wird akzeptiert.

Aus dem ermittelten Abstand $\Delta_{\beta px}$ in Pixeln kann durch (7.8) der tatsächliche Abstand Δ_β berechnet werden. Aus diesem Abstand und (7.9) lässt sich der Versatz Δ_x errechnen.

$$bp_x \approx \frac{\tan\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \cdot l_1 \cdot 2}{x_{Resolution}} \quad \Delta_\beta = bp_x \cdot \Delta_{\beta px} = \frac{\tan\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \cdot l_1 \cdot 2}{x_{Resolution}} \cdot \Delta_{\beta px} \quad (7.8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{z_d}{\Delta_\beta}\right) \quad (7.9)$$

$$\Delta_x = \cos(\beta) \cdot l_2 = \cos\left(\arctan\left(\frac{z_d}{\Delta_\beta}\right)\right) \cdot l_2 \quad (7.10)$$

Basierend auf ähnlichen Dreiecken können die Entfernungen z_1 und z_2 ermittelt werden:

$$\frac{z_2}{\Delta_x} = \frac{z_d}{\Delta_\beta} \quad z_1 = \frac{\Delta_x \cdot z_d}{\Delta_\beta} - z_d$$

Auf gleiche Weise wie Δ_β kann Δ_α berechnet werden (7.11), woraus sich durch den Tangenssatz α ergibt (7.12).

$$\Delta_\alpha \approx \frac{\tan\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \cdot z_1 \cdot 2}{x_{Resolution}} \cdot \Delta_{\alpha px} \quad (7.11)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z_1}{\Delta_\alpha}\right) = \arctan\left(\frac{x_{Resolution}}{\tan\left(\frac{\alpha_k}{2}\right) \cdot 2 \cdot \Delta_{\alpha px}}\right) \quad (7.12)$$

Zusätzlich zu Δ_x und α kann durch die Geometrie des Kniehebels der Winkel θ berechnet werden (siehe Abbildung 7.20). Der Kniehebel bildet ein gleichschenkeliges Dreieck, das im Kamerabild mit demselben Winkel θ wie die Kamera (gegenüber dem Kniehebel) verdreht wird. Durch die geometrischen Zusammenhänge zwischen verdrehtem und nicht verdrehtem Dreieck lässt sich θ bestimmen (7.13).

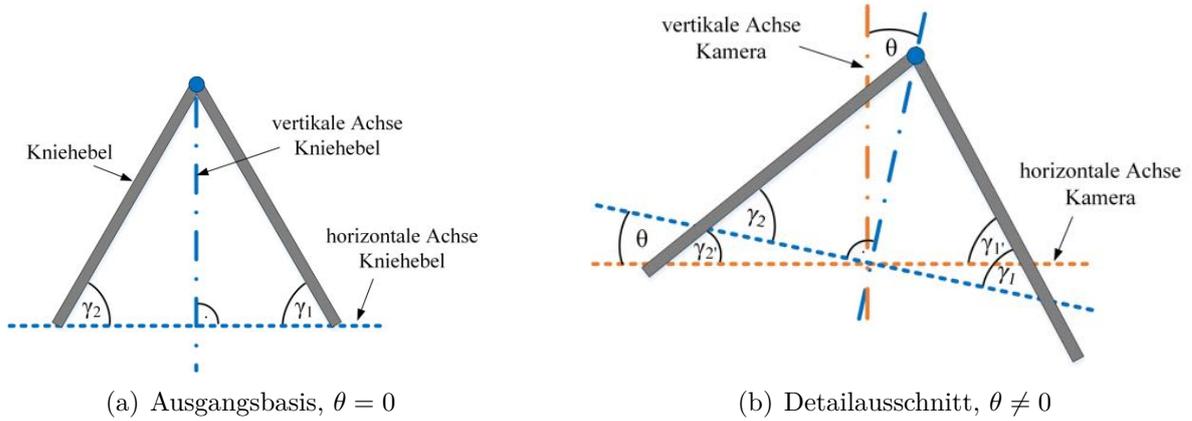


Abbildung 7.20: Skizze: Winkelbestimmung (Seitenansicht), ToF-Kamera

$$\gamma_1 = \gamma_2 \quad \gamma_{2'} = \gamma_2 - \theta \quad \gamma_{1'} = \gamma_1 + \theta$$

$$\gamma_{2'} + \theta = \gamma_{1'} - \theta \quad \Rightarrow \quad \theta = \frac{\gamma_{1'} - \gamma_{2'}}{2} \quad (7.13)$$

8 TEST UND EVALUIERUNG DER TRENNVORRICHTUNG

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den vorhergehenden Kapiteln wurde in einem ersten Schritt ein Versuchsaufbau für das Labor aufgebaut (siehe Abbildung 8.1). Dieser besteht aus einem Grundgerüst, an dem Schraubenkupplungen, Bremsschläuche und Puffer originalgetreu montiert wurden. Anhand dieses Versuchsaufbaus war es möglich, die verschiedensten Ideen und Konzepte für das Langmachen und Entkuppeln auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen. Darauf aufbauend entstanden Demonstratoren für das Langmachen und Entkuppeln im Labor (siehe Abbildung 8.2). Der Aufbau im Labor ist allerdings mit Einschränkungen verbunden. So können weder verschiedene Arten der Kupplungsschwengel noch unterschiedliche Bremsschläuche sowie Witterungseinflüsse et cetera untersucht werden. Daher ist es notwendig, in weiterer Folge mit den labortauglichen Konzepten an Güterwagen am Verschiebebahnhof Versuche durchzuführen.



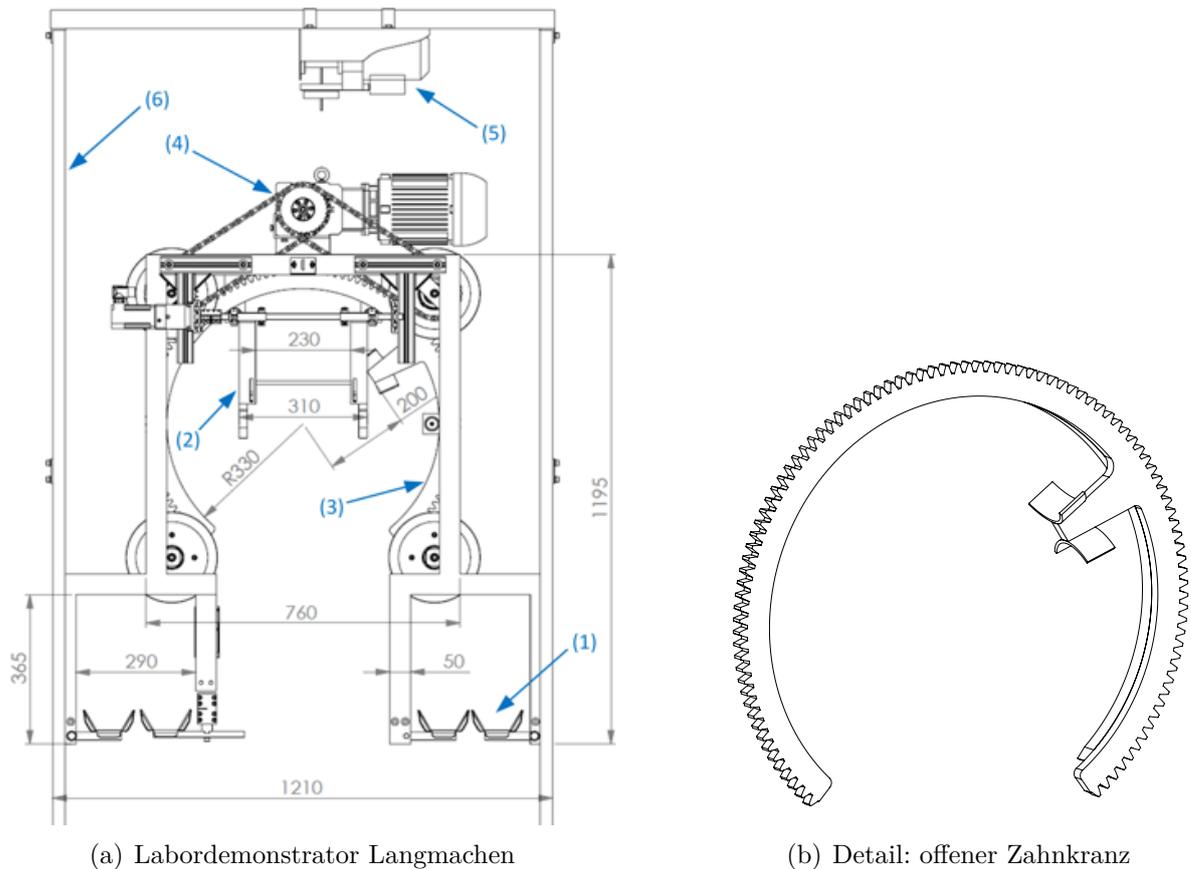
Abbildung 8.1: Versuchsaufbau mit originalen Bauteilen von Güterwagen (Schraubenkupplung, Bremsschläuche, Puffer)



Abbildung 8.2: Versuchsaufbau mit Demonstratoren für das Langmachen und Entkuppeln [vgl. 43, S.28]

8.1 LABORTESTS LANGMACHEN

Die Umsetzung des Demonstrators für das Langmachen (Bremschläuche öffnen, Kuppelungsschwengel positionieren, Schraubenkupplung aufschrauben) erfolgte auf Basis des entwickelten Lösungskonzeptes 1 (Anheben - Drehachse - Ring) aus Kapitel 5.7. Dabei wurden die Klappen für das Öffnen der Bremschläuche (1) um Schaufeln ergänzt (Abbildung 8.3 (a)), um die Bremschläuche sicher zu führen. Ebenso fand bei der Kuppelungsschwengelpositionierung (2) eine Anpassung der Geometrie (um seitlich liegende Kupplungsschwengel zu erfassen) und eine Ergänzung um eine Federrückstellung statt (Abbildung 8.3 (a) und 8.4). Der offene Ring für das Aufschrauben der Schraubenkupplung wurde als Zahnkranz (3) ausgeführt und mit einem schaufelförmigen Mitnehmer ausgestattet (siehe Abbildung 8.3 (b)). Die Rotationsbewegung des Zahnkranzes erfolgt durch zwei Zahnräder, die über Ketten von einem Elektromotor angetrieben werden (4) (siehe Abbildung 8.3 (a)). Durch eine Seilwinde (5) lässt sich die gesamte Vorrichtung, an den Seiten geführt durch Winkelprofile (6), anheben (siehe Abbildung 8.3 (a)).



(a) Labordemonstrator Langmachen

(b) Detail: offener Zahnkranz

Abbildung 8.3: Übersicht Labordemonstrator Langmachen, Maße in [mm], [vgl. 43, S.15,34], [vgl. 35]

(1)...Klappen mit Schaufeln (2)...Gestänge (3)...offener Zahnkranz (4)...Antrieb Zahnkranz
 (5)...Seilwinde (6)...Winkelprofile

Zusätzlich zu den Komponenten für das Langmachen sind weitere Elemente für einen automatischen Betrieb notwendig:

- Ultraschallsensoren für die Messung des Abstandes zur Schraubenkupplung (Höhe)
- Induktive Sensoren als Referenzschalter und um die Umdrehungen des Zahnkranzes zu zählen
- Elektromotoren als Antriebe
- SPS mit digitalen und analogen Ein- und Ausgängen für die Datenerfassung, Steuerung und Visualisierung

Diese wurden an der Vorrichtung verbaut und eine Steuerungssoftware für einen automatischen Ablauf für die SPS entwickelt.

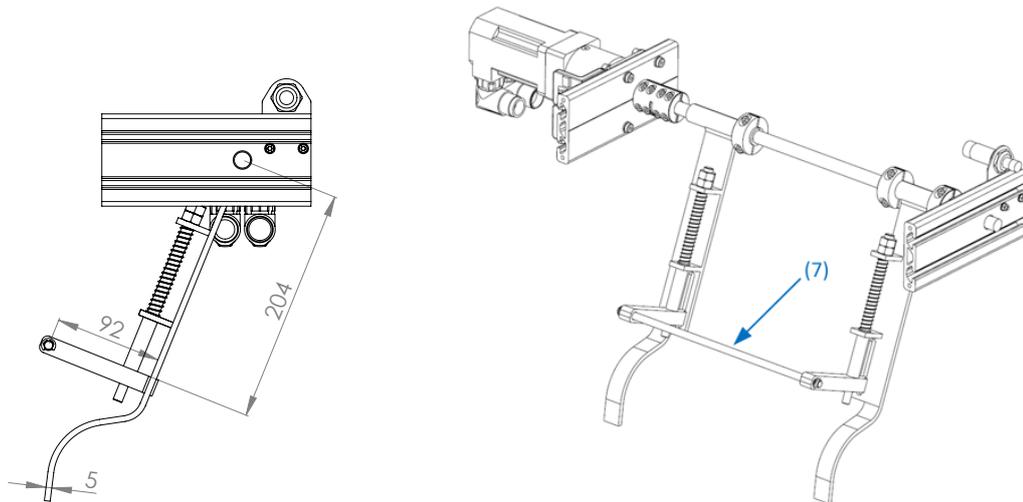


Abbildung 8.4: Detail: Kupplungsschwengel positionieren, Maße in [mm], [vgl. 43, S.30]

(7)...Querstange

Anhand folgender Testszenarien wurde der Demonstrator getestet:

- Vollständig geschlossene Schraubenkupplung
 - Variation der Kupplungsschwengelposition (oben liegen, seitlich im Sicherungshaken, undefinierte Sicherungsposition)
- Leicht geöffnete Schraubenkupplung
 - Variation der Kupplungsschwengelposition (oben liegen, seitlich im Sicherungshaken, undefinierte Sicherungsposition)
- Verschiedene Bremsschlauchkombinationen (ein oder zwei gerade verbundene Schläuche oder diagonal verbundene)

Anhand des Labordemonstrators konnte gezeigt werden, dass sowohl ein Aufschrauben der Schraubenkupplung durch den offenen Zahnkranz als auch eine Positionierung des Kupplungsschwengels automatisch möglich ist. Ebenso erwies sich das Konzept zum Öffnen der Bremsschläuche bei parallel zum Gleis verbundenen Bremsschläuchen als praktikabel. Lediglich für diagonal verbundene Bremsschläuche ist eine Überarbeitung des Konzeptes erforderlich, da die Bremsschläuche beim Anheben aus der Schaufel rutschen.

Ein Problem tritt bei der Positionierung des Kupplungsschwengels auf, wenn der Kupplungsschwengel oben auf der Schraubenkupplung liegt (siehe Abbildung 8.5) und die Schraubenkupplung bereits etwas durchhängt. Dann ist es möglich, dass die Querstange (7) (siehe Abbildung 8.4) nicht unter dem Kupplungsschwengel einfädeln kann.



Abbildung 8.5: Oben liegender Kupplungsschwengel, Schraubenkupplung leicht aufgeschraubt

8.2 FELDTTESTS LANGMACHEN

Um den Labordemonstrator für das Langmachen unter möglichst realen Bedingungen zu testen, wurde dieser so umgebaut, dass er mit Schrauben an einer Baggerschaufel befestigt werden kann. Ebenso erfolgte die Integration des Schaltschranks für die Bedienung und Steuerung (siehe Abbildung 8.6). Der Zweiwegebagger (kann sich auf Schienen und normalem Gelände bewegen) ermöglichte es, die Trennvorrichtung entlang eines stehenden Zuges (am Nachbargleis) zu den Trennstellen zu bewegen. Dabei erfolgte die exakte Ausrichtung des Demonstrators (Trennvorrichtung) zur Schraubenkupplung durch den Zweiwegebagger. Der Ablauf des Langmachens selbst (Bremschläuche öffnen, Kupplungsschwengel positionieren, Schraubenkupplung aufschrauben) fand automatisiert durch die Steuerung statt. Der Test erfolgte auf einer Strecke von zirka 250 m an verschiedenen Trennstellen eines Zuges am Verschiebebahnhof Linz Gleis 187.

Im Rahmen der Feldtests konnten folgende Situationen getestet werden:

- Schraubenkupplungen mit konischem oder flachem Kupplungsschwengel
- Verschiedene Sicherungspositionen des Kupplungsschwengels
- Gerade verbundene Bremschläuche
- Verschiedene Güterwagen (Flachwagen, gedeckt, offen)



(a) Trennvorrichtung im Kupplungsbereich



(b) Zweibegebagger mit Trennvorrichtung

Abbildung 8.6: Aufnahmen Feldtest Langmachen

Durch die durchgeführten Versuche an den Güterwagen am Verschiebebahnhof Linz konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die für eine Weiterentwicklung entscheidend sind:

- Das Aufschrauben der Schraubekupplung funktioniert sehr robust.
- Die Kupplungsschwengelpositionierung erfordert eine sehr hohe Positionsgenauigkeit der Trennvorrichtung (zirka $\pm 2\text{ mm}$), siehe Abbildung 8.7. Im Sinne der Robustheit muss die Positionstoleranz in der weiteren Entwicklung vergrößert werden.
- Der Bewegungsablauf für die Kupplungsschwengelpositionierung funktioniert sehr gut. Ebenso die gefederte Querstange.
- Gelegentlich kommt es zu einem erhöhten Motormoment (Kupplungsschwengelpositionierung) durch leichtes steckenbleiben (Reibung) et cetera. Dem kann durch Anpassung des Bewegungsablaufes oder Erhöhung des zulässigen Motormoments entsprochen werden.

- Bremsschläuche mit verschiedenen Längen bereiten Probleme beim Öffnen. Diese liegen mit dem Bajonettverschluss nicht symmetrisch in der Mitte der Trennstelle, sondern versetzt und somit außerhalb der Schaufeln. Eine Anpassung der Schaufeln kann dieses Problem lösen.



Abbildung 8.7: Positionierung Kupplungsschwengel, Feldtest

Anhand der Versuchsergebnisse erscheint die Funktionsweise des Demonstrators für das Langmachen geeignet und realisierbar. Einzelne Details wie die Kupplungsschwengelpositionierung müssen noch weiter verfeinert werden, die grundsätzliche Funktionsfähigkeit ist jedoch gegeben. Aufgrund dessen soll das bestehende Konzept weiter verfolgt und optimiert werden. Ebenso gilt es im nächsten Schritt, ein geeignetes Konzept zu finden, um die Vorrichtung automatisch entlang der stehenden Züge zu den einzelnen Trennstellen zu bewegen.

8.3 LABORTESTS ENTKUPPELN

Der Laboraufbau ermöglichte es, Versuche zu verschiedenen Ideen für das Entkuppeln (Trennvorrichtung positionieren, Schraubekupplung fassen, Schraubekupplung anheben) durchzuführen und auf ihre Plausibilität zu testen. Für Versuche des ausgewählten Konzeptes (siehe Kapitel 5.8) bestehend aus Aushängeplatte - Kniehebel - Seiltrieb wurde ein einfacher Demonstrator, bestehend aus Konstruktionsprofilen (Aluminium) für den Kniehebel, Stahlblech für die Aushängeplatte und einer Seilwinde als Antrieb aufgebaut (siehe Abbildung 8.8). Durch den Seiltrieb können die unteren Enden des Kniehebels symmetrisch zusammengezogen werden, wodurch der Kniehebel unter der Schraubekupplung hochklappt.



Abbildung 8.8: Labordemonstrator Entkuppeln

Nachfolgend eine Auflistung der untersuchten Szenarien:

- Wechselnde Verwendung der beiden verbauten Schraubenkupplungen (eine eingehängt im gegenüberliegenden Zughaken, die andere versorgt)
- Unterschiedlich stark aufgeschraubte Schraubenkupplung (die Anzahl an Umdrehungen wurde variiert)
- Verschiedene Positionen des Kupplungsschwengels (Sicherungspositionen nach Abbildung 3.14 und undefinierte Positionen)
- Einseitig aufgeschraubte Schraubenkupplung (siehe Abbildung 8.9)

Im Zuge der Laborversuche zeigte sich, dass der Bewegungsablauf für das Entkuppeln funktioniert und die Platzverhältnisse ausreichend sind. Des Weiteren wurde die Form der Aushängeplatte leicht angepasst (die Laschen stehen nun in einem flacheren Winkel zur Seite, siehe Abbildung 8.8 im Vergleich zu Abbildung 5.15). Die Versuche zeigten eine robuste Funktionsweise. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgte die Weiterentwicklung zu einer funktionsfähigen Anlage, um fahrende Güterwagen zu entkuppeln.



Abbildung 8.9: Beispiel für eine einseitig aufgeschraubte Schraubenkupplung

8.4 FELDTTESTS ENTKUPPELN

Im Folgenden sind die Trennvorrichtung (Demonstrator) für das Entkuppeln an fahrenden Zügen sowie die Erkenntnisse betreffend Mechanik und Sensorik dargelegt.

8.4.1 TESTANORDNUNG

Die Trennvorrichtung wurde am Nebenabrollberg am Verschiebebahnhof Linz Gleis 187 eingebaut (siehe Abbildung 8.10). An dieser Stelle war es aufgrund der geringeren Betriebsintensität des Verschubs möglich, ungestört Versuche durchzuführen. Zusätzlich verfügt dieses Gleis über ausreichend Platz neben dem Gleis, um die Sensorik und den Schaltschrank zu verbauen. Der Gleisabschnitt ist gerade und eine Stromversorgung ist bereits vorhanden. Die Stelle des Einbaus der Trennvorrichtung liegt zirka 100 m von der Bergkuppe entfernt, wodurch die maximale Länge der Wagengruppen entsprechend eingeschränkt ist (siehe Kapitel 4.5.5).

Die Stangen des Kniehebels wurden als Knickstäbe ausgelegt und bestehen aus UV-beständigem PVC. Dadurch lässt sich ein Schaden bei Kollisionen sehr stark reduzieren, da nur die Stangen brechen. Für einen schnellen Wechsel sind diese steckbar mit der Trennvorrichtung und der Aushängeplatte verbunden. In ersten Versuchen zeigte sich ein Splitterflug (bei einem Stangenbruch), der sich allerdings durch ein übergestreiftes Netz vermeiden lässt (siehe Abbildung 8.10, grünes Netz um den Stangen).



Abbildung 8.10: Felddemonstrator Entkuppeln

8.4.2 SENSORIK

Folgende Sensoren (siehe Kapitel 6) wurden für das automatische Entkuppeln eingebaut und mit entsprechenden Algorithmen (siehe Kapitel 7) ausgewertet:

- ToF-Kamera in Verbindung mit neuronalen Netzen
 - Kupplungserkennung
 - Positionsbestimmung der Schraubekupplung
 - Bestimmung des Status (langgemacht, nicht langgemacht)
- Laserscanner in Verbindung mit neuronalen Netzen
 - Kupplungserkennung
 - Positionsbestimmung der Schraubekupplung
- Radsensoren
 - Achszählung
 - Geschwindigkeitsbestimmung
 - Detektion der Fahrtrichtung des Zuges
- Radar
 - Geschwindigkeitsbestimmung

Die Positionierung der Sensoren auf der Teststrecke ist in Abbildung 8.11 dargestellt.

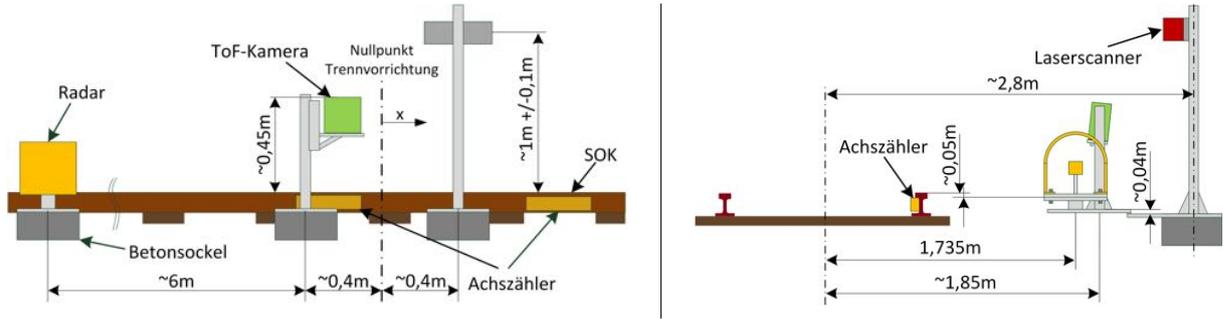


Abbildung 8.11: Anordnung der Sensoren, Felddemonstrator Entkuppeln

8.4.3 SIMULATION UND MESSERGEBNISSE

Die folgenden Angaben und Ergebnisse beziehen sich auf das Modell in Kapitel 5.8.1. Die Regelgrößen des Modells sind x_D und x_H , die indirekt durch die Geber der Motoren des Seiltriebs zur Verfügung stehen. Dementsprechend beziehen sich alle anderen Größen ebenso auf die Messgrößen der Motoren (F_{c1} , F_{c2} ,...). Im ersten Schritt gilt es, die auf die Motoren wirkenden Reibungskräfte (Coulombsche Reibung F_c , viskose Reibung $d \cdot \dot{x}$) der Trennvorrichtung zu ermitteln. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Ermittlung der auftretenden Kräfte bei Bewegungen mit unterschiedlichen konstanten Geschwindigkeiten
2. Automatische Ermittlung durch Methoden der adaptiven Regelung

Folgende Werte konnten aus Messungen nach Variante (1) ermittelt werden (Geschwindigkeit: $0,1 \frac{m}{s}$ bis $2,5 \frac{m}{s}$):

$$F_{c1} = 240N \quad F_{c2} = 200N \quad d_1 = 40 \frac{kg}{s} \quad d_2 = 45 \frac{kg}{s}$$

Basierend auf den Modellgleichungen (siehe Kapitel 5.8.1) wird eine Simulation und Regelung mit folgenden Parameterwerten erstellt (Bezeichnung siehe Kapitel 5.8.1) in (8.1) und (8.2):

$$m_1 = m_2 = 34,5 kg \quad m_H = 10 kg \quad m_s = 0,912 kg \quad l = 1,46 m \quad (8.1)$$

$$i = 10 \quad r = 0,145 m \quad (8.2)$$

Die Simulation und Regelung umfasst den gesamten nötigen Bewegungsablauf (dargestellt in Abbildung 8.12) des Entkuppelns (auf Basis der Bewegungsabläufe in Kapitel 4.3.2). Zu Beginn findet ein Beschleunigen der Mechanik und die Positionierung unterhalb der Schraubenkupplung statt ($P1$). Der Kniehebel wird nun aufgerichtet, allerdings besonders am Anfang sehr langsam und mit begrenzter Beschleunigung (hohe Kräfte, $P2$). Nach Überschreiten einer definierten Höhe (zirka $0,15\text{ m}$ über SOK) erfolgt ein deutlich schnelleres Aufrichten ($P3$). Knapp unterhalb der Schraubenkupplung wird die Geschwindigkeit reduziert (auf $\sim -0,3\frac{\text{m}}{\text{s}}$, $P4$) und nach einer festgelegten Strecke ($0,04\text{ m}$) wieder erhöht ($P5$), um den Stoß niedrig zu halten. Ist die Schraubenkupplung abgeworfen ($\sim 2,7\text{ s}$), klappt der Kniehebel ein ($P6$) und fährt in seine Ausgangslage zurück ($P7$).

In Abbildung 8.12 und 8.13 ist der Verlauf der Positionen und Geschwindigkeiten des Bewegungsablaufes einer Simulation mit Rückfahrt zur Ausgangslage abgebildet. Der dazugehörige Verlauf der Kräfte ist in Abbildung 8.14 dargestellt. Dabei waren in diesem Fall die vorgegebenen Zeiten für Versuchs- und Dokumentationszwecke konservativ eingestellt (Hochklappen: $1,9\text{ s}$ statt $1,5\text{ s}$, Einklappen: $1,6\text{ s}$ statt $1,2\text{ s}$). Die Trennvorrichtung führte mit einer Verzögerung (Ansprechzeit von Leistungselektronik und Motor, sonstige Latenzzeiten,...) von 15 ms identische Bewegungen wie die Simulation aus. Die Unterschiede treten daher im Kraftverlauf auf.

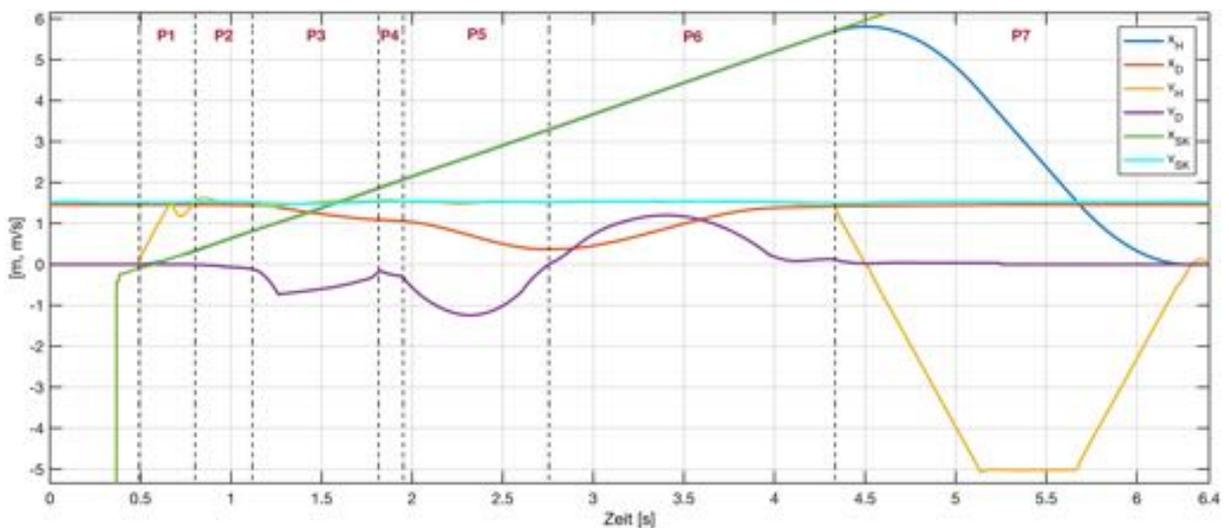


Abbildung 8.12: Positions- und Geschwindigkeitsverlauf einer Simulation

$$v_H = \dot{x}_H \quad v_D = \dot{x}_D \quad x_{SK} \dots \text{ermittelte Position Schraubenkupplung} \quad v_{SK} = \dot{x}_{SK}$$

$$P_{1-7} \dots \text{Phasen des Entkuppelungsprozesses}$$

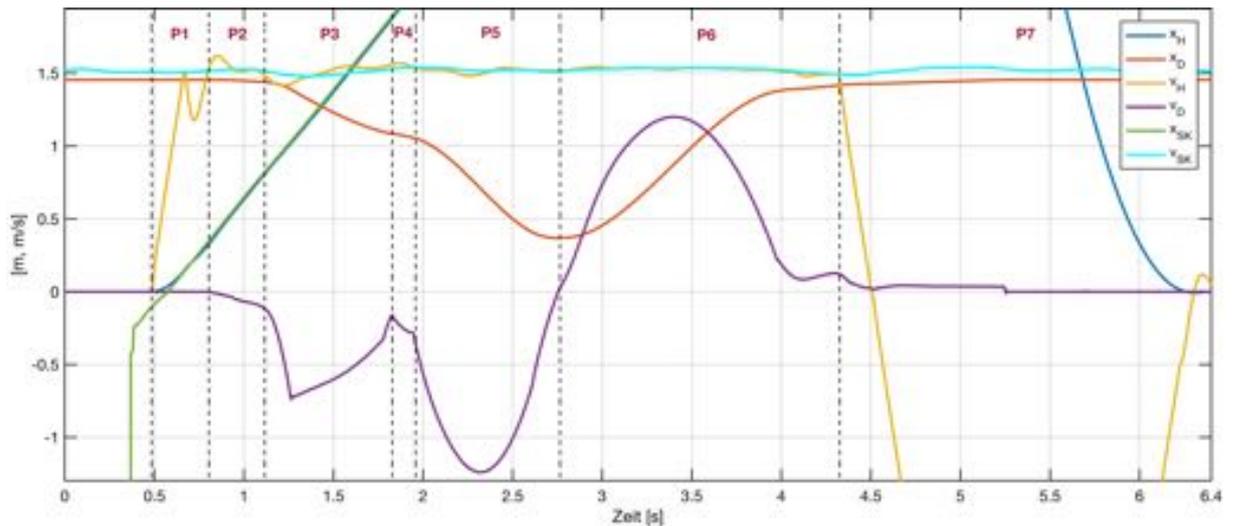


Abbildung 8.13: Detailausschnitt von Abbildung 8.12, Positions- und Geschwindigkeitsverlauf einer Simulation

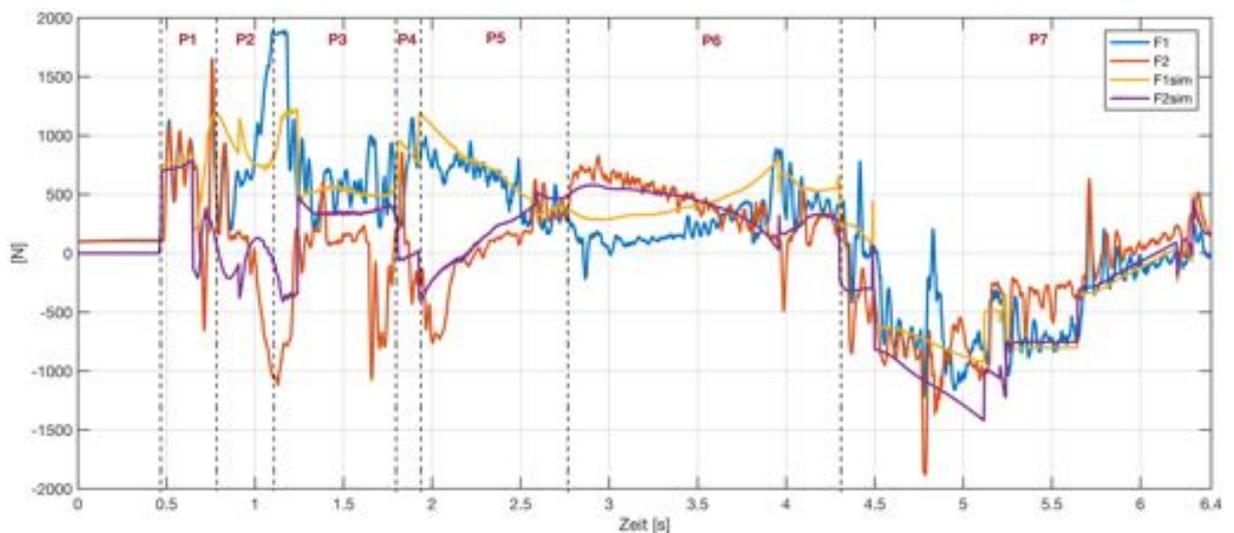


Abbildung 8.14: Kräfteverlauf von Simulation und Messung

F_1/F_2 ...Motorkräfte (siehe Modell in Kapitel 5.8.1)

F_{1sim}/F_{2sim} ...Simulationswerte der Motorkräfte

Grundsätzlich zeigen die Kraftverläufe von Simulation und Messung ein ähnliches Verhalten (siehe Abbildung 8.14). Die Messungen zeigen allerdings eine deutliche Schwingungsneigung. Dies kann zum Teil auf das elastische Verhalten der Seile zurückgeführt werden (siehe Bereiche mit eingeklappten Kniehebel, bis 0,7 s, ab 5,3 s). Besonders am Beginn des Hochklappens wirkt zusätzlich die Elastizität der PVC-Stangen des Kniehebels (~ 1 s). Die markante Kraftspitze bei 1,7 s entsteht, wenn der Kniehebel beim Hochklappen Bremschläuche aus dem Weg schiebt.

Letztlich zeigen die Messungen, dass das Modell die Vorrichtung mit Ausnahme des elastischen Verhaltens sehr gut abbildet. Aufgrund der Abhängigkeit des Schwingungsverhaltens von Temperatur, Seilvorspannung et cetera und der Einsetzbarkeit des Modells auf verschiedenen Verschiebebahnhöfen bleibt dies im Modell unbehandelt.

8.4.4 VERIFIKATION

Die Einhaltung der Forderungen der Anforderungsliste (Tabelle 4.8) wurde fortlaufend kontrolliert und die Anforderungsliste ebenso bei neuen Erkenntnissen aktualisiert und auf Plausibilität überprüft. Die Funktionsweise des Konzeptes, die Überprüfung der auftretenden Kräfte und Beschleunigungen konnten anhand der durchgeführten Modellbildung und Simulation kontrolliert werden. Des Weiteren wurden die Einhaltung der räumlichen Verhältnisse und die grundlegenden Berechnungen (siehe Kapitel 4.3.2) anhand von CAD-Modellen und Laborversuchen (siehe Kapitel 8.3) überprüft. Ebenso fand eine Überprüfung der ausgewählten Sensoren anhand diverser Versuche in den Verschiebebahnhöfen Wels und Linz statt. Alle Ergebnisse zeigten die Einhaltung der Forderungen der Anforderungsliste.

8.4.5 VALIDIERUNG

Anhand des am Verschiebebahnhof Linz aufgebauten Demonstrators war es möglich die Funktionsweise der Trennvorrichtung (Mechanik und Sensorik) und die Einhaltung der Leistungsvorgaben zu validieren. In Versuchen ohne Güterwagen konnte ein Entkuppeln mit einer fiktiven Zuggeschwindigkeit von bis zu $2,5 \frac{m}{s}$ erreicht werden. Allerdings zeigte sich, dass mit den vorgegebenen Parametern ein vollständiger Entkupplungsvorgang bei $2,5 \frac{m}{s}$ ungefähr $6 s$ anstatt der erforderlichen $4,8 s$ (siehe Kapitel 4.3.2, Idealwert) benötigt. Dies wäre notwendig um zwei aufeinander folgende Trennstellen eines $12 m$ langen Güterwagens bei $2,5 \frac{m}{s}$ zu entkuppeln. Aus den $6 s$ resultiert eine Geschwindigkeit von $v_{Zug} = \frac{12m}{6s} = 2 \frac{m}{s}$, womit der Sollwert der Forderung von $2 \frac{m}{s}$ erfüllt wird. Die Ergebnisse aus den Versuchen mit Güterwagen sind in Kapitel 8.4.6 angeführt. Die Simulation zeigt, dass als effektivster beeinflussbarer Bereich die Rückfahrt zur Ausgangslage in Frage kommt. Durch eine Steigerung der maximal zulässigen Geschwindigkeit der Trennvorrichtung auf $7,5 \frac{m}{s}$ und der Beschleunigung auf $12 \frac{m}{s^2}$ kann der Entkupplungsvorgang auf $5,4 s$ reduziert werden, was einer Zuggeschwindigkeit von $2,2 \frac{m}{s}$ entspricht.

8.4.6 TESTERGEBNISSE

Im Rahmen der Versuchsvorbereitung wurden an über 10 Zügen mit jeweils 3 bis 15 Güterwagen die Daten der verbauten Sensoren aufgezeichnet. Mit diesen Daten konnten die neuronalen Netze auf die unterschiedlichen Ausprägungen der Güterwagen trainiert werden. Dabei zeigten alle neuronalen Netze (Kupplungserkennung, Statusbestimmung, Positionsbestimmung) anhand der aufgezeichneten Daten zufriedenstellende Ergebnisse.

Die anschließenden Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Zügen und jeweils mehrfach mit Geschwindigkeiten im Bereich von $0,3 \frac{m}{s}$ bis $1,7 \frac{m}{s}$ durchgeführt. Die getrennten Schraubenkupplungen wurden dazu jeweils neu verbunden und ihr Durchhang variiert. Außerdem erfolgte ein Wechsel zwischen versorgten und unversorgten Schraubenkupplungen und Bremsschläuchen.

Folgende Erkenntnisse konnten aus den Tests gewonnen werden:

Mechanik

- Der Bewegungsablauf für das Entkuppeln funktioniert sehr gut und der Kniehebel hat ausreichend Platz zwischen den Güterwagen.
- Es kann in einem Bereich von ungefähr $\pm 0,1 m$ zur Kupplungsmitte zuverlässig entkuppelt werden. Womit die Forderung von $\pm 0,05 m$ (siehe Tabelle 4.8) um 100% übertroffen wird.
- Das Gleis der Teststrecke weist am Einbauort der Vorrichtung ein leichtes Gefälle auf. Dies hat deutliche negative Auswirkungen auf den Prozess. So kommt es dadurch zu einem Spannen der Schraubenkupplung (siehe Abbildung 8.15 (a)) im Bereich der Vorrichtung und ein Entkuppeln wird unmöglich. Durch eine Mindestgeschwindigkeit des Zuges von $1,1 \frac{m}{s}$ oder einem leichten Bremsen des ersten Güterwagens lässt sich das Spannen verhindern.
- Die Bruchkraft der PVC-Stangen des Kniehebels ist zu gering (siehe Abbildung 8.16).
- Flache Kupplungsschwengel (siehe Abbildung 3.13) können nur auf eine Seite geklappt werden. Auf die andere Seite wird dies durch einen Anschlag (erkennbar in Abbildung 3.13 (a)) verhindert (zirka 90° zur Spindel). Liegt der Kupplungsschwengel während des Aushängens ungünstig, führt dies zu einem Abstecken der PVC-Stangen von der restlichen Vorrichtung (siehe Abbildung 8.15 (b)).

Sensorik

- Alle Schraubenkupplungen konnten zuverlässig erkannt werden.
- Sowohl ToF-Kamera als auch Laserscanner funktionieren zuverlässig bei direkter Sonneneinstrahlung.
- Die Geschwindigkeitsmessung durch den Radarsensor funktioniert robust und zuverlässig.
- Bei der Positionsbestimmung zeigen die Ergebnisse der neuronalen Netze vereinzelt deutliche Schwankungen von über $\pm 0,2 m$. Durch ein Training mit mehr Daten kann dies verbessert werden.
- Die Sensorfusion liefert sehr gute Resultate. So werden Schwankungen und Ausreißer ausgeglichen und die Position der Schraubenkupplung zuverlässig ermittelt.
- Die Erkennung des Status der Schraubenkupplung (langgemacht, nicht langgemacht) funktioniert noch nicht zuverlässig. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass Trennstellen, bei denen sich die Pufferplatten nicht berühren (Schraubenkupplung gespannt), als nicht langgemacht behandelt werden. Dies kann scheinbar von den neuronalen Netzen nicht sauber getrennt werden, da zum Beispiel Bremschläuche dann in beiden Fällen geöffnet sein können oder die Schraubenkupplung durchhängt. Eine Verbesserung der Erkennung kann durch mehr Daten für das Training oder eine Auftrennung auf zwei separate Netze (Erkennung langgemacht, Pufferplatten berühren sich) erfolgen.



(a) Spannen der Schraubenkupplung



(b) Abstecken der Stangen

Abbildung 8.15: Aufgetretene Probleme beim automatischen Entkuppeln



Abbildung 8.16: Aufgetretene Probleme beim automatischen Entkuppeln, Stangenbruch

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die an die Trennvorrichtung gestellten Anforderungen erfüllt werden können, aber in den Bereichen Sensorik und Mechanik noch Verbesserungspotentiale bestehen. Diese stellen jedoch im Zuge der weiteren Entwicklung überwindbare Hindernisse dar, wodurch aus heutiger Sicht die Umsetzung einer automatischen Trennvorrichtung für das Entkuppeln realisierbar und plausibel erscheint.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war die Analyse bestehender Prozesse und Systeme sowie die Entwicklung einer automatischen Vorrichtung zum Trennen von Schraubenkupplungen. Die Schraubenkupplung stellt seit über 150 Jahren die Zugverbindung zwischen Eisenbahn-Güterwagen sicher. Bereits im frühen 20. Jahrhundert wurden automatische Kupplungen entwickelt, die mittlerweile sehr ausgereift sind und auch weltweit zum Einsatz kommen. Lediglich innerhalb Europas konnte sich die automatische Kupplung im Güterwagenverkehr bis heute nicht durchsetzen. Aufgrund dessen wurden Konzepte gesucht, die die schweren manuellen Tätigkeiten in Verbindung mit der Schraubenkupplung automatisierbar machen.

Die Tätigkeiten beim Trennen der Schraubenkupplung umfassen:

Langmachen

- Identifizierung der Trennstelle (jene Verbindung zwischen zwei Güterwagen, die gelöst werden soll)
- Betätigen des Lösezuges (lösen der Druckluftbremse)
- Schließen der Absperrhähne (für die Druckluftleitungen der Bremsen)
- Öffnen der Bremsschläuche
- Aufschrauben der Schraubenkupplung

Entkuppeln

- Identifizierung der langgemachten Schraubenkupplung
- Kontrolle der Trennstelle
- Aushängen der Schraubenkupplung

Anhand der genauen Untersuchung der Gegebenheiten (Geometrie, Abläufe,...) und des Standes der Technik konnte aufgezeigt werden, welche Voraussetzungen für eine automatische Trennvorrichtung notwendig sind. Es wurden klare Randbedingungen definiert, die für einen Einsatz am Verschiebebahnhof einzuhalten sind. So ist zum Beispiel der Schutz der Arbeitnehmer ein wichtiger Aspekt, der zu jeder Zeit gegeben sein muss. Dies betrifft nicht nur Kollisionsgefahren mit bewegten Komponenten, sondern auch Stolpergefahren und zum Beispiel Augensicherheit (Laserstrahlen,...). Ebenso ist die wirtschaftliche Umsetzbarkeit ein entscheidendes Kriterium, die durch eine einfache Integration ohne Änderungen der Betriebsabläufe und ohne Änderungen der Infrastruktur zu gewährleisten ist.

Der Vergleich zwischen den Verhältnissen am Verschiebebahnhof und den Vorgaben aus diversen Normen zeigte teilweise deutliche Abweichungen. So ist es gängige Praxis, dass Schraubenkupplungen und Bremsschläuche häufig nicht wie vorgesehen versorgt werden, sondern einfach herabhängen. Dies führt häufig dazu, dass die vorgegebene Begrenzungslinie nicht eingehalten wird (0,125 m über Schienenoberkante SOK) und Schraubenkupplung sowie Bremsschläuche deutlich tiefer herabhängen (bis zu 0,06 m unter SOK). Zusätzlich wird auch die zulässige Höhe der Puffer und der Schraubenkupplung (0,94 m bis 1,065 m über SOK) um bis zu 0,09 m überschritten.

Um die einzelnen Prozesse zu automatisieren, sind verschiedene Informationen entscheidend. So sind unter anderem die Erkennung sowie die Positionsbestimmung der Schraubenkupplung wesentlich. Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten, muss zusätzlich noch der Status der Schraubenkupplung (langgemacht oder nicht langgemacht) erkannt werden.

Durch die bedeutenden Fortschritte im Bereich der Sensorik (Time-of-Flight Kamera,...), künstlichen neuronalen Netzen und in der Leistungsfähigkeit moderner Rechner ist die Erfassung der notwendigen Parameter (Position der Schraubenkupplung,...) für einen automatischen Betrieb möglich. Abschätzende Berechnungen zu den erforderlichen Kräften für das Langmachen sowie die kinematischen Anforderungen für das Entkuppeln belegen die technische Machbarkeit. Eine Analyse des Einsparungspotentials durch die automatische Trennvorrichtung gibt den Kostenrahmen für die zu entwickelnde Trennvorrichtung bei einer Amortisationszeit von drei bis fünf Jahren vor. So ergeben sich bei einer Amortisationsdauer von fünf Jahren zulässige Investitionskosten von 1.050.000 € für das Langmachen und 300.000 € für das Entkuppeln pro Verschiebebahnhof.

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse entstanden auf Basis der VDI 2221 verschiedene mechanische Konzepte für das Langmachen und das Entkuppeln, die sowohl anhand technischer als auch wirtschaftlicher Kriterien bewertet wurden. Die geeignetsten Konzepte wurden weiter ausgearbeitet und schließlich als Demonstratoren aufgebaut. Das finale mechanische Konzept für das Langmachen stellt eine Kombination aus klappbaren Schaufeln (Bremschläuche öffnen), drehbar gelagertem Gestänge (Kupplungsschwengel positionieren) und offenem Zahnkranz (Schraubenkupplung aufschrauben) dar. Für das Entkuppeln wird eine Kombination aus Seiltrieb (Trennvorrichtung positionieren), Aus-hängeplatte (Schraubenkupplung fassen) und Kniehebel (Schraubenkupplung anheben) eingesetzt.

Es zeigte sich, dass die Aufnahmen einer Time-of-Flight Kamera (ToF-Kamera) für die Erkennung der Schraubenkupplung hervorragend geeignet sind. Diese Kameras erstellen dreidimensionale Aufnahmen der Schraubenkupplung, anhand derer der Hintergrund ausgeblendet und der Bereich der Schraubenkupplung separiert werden kann. Zusätzlich liefern die Aufnahmen eines neben dem Gleis montierten Laserscanners sehr charakteristische Aufnahmen der Puffer, welche in geraden Gleisabschnitten mit der Mitte der Schraubenkupplung in einer Ebene liegen. Besonders diese Aufnahmen ermöglichen es durch das breite Sichtfeld des Laserscanners, die Position der Schraubenkupplung über eine Strecke von $\sim 3 m$ zu bestimmen.

Zur Auswertung der Daten von ToF-Kamera und Laserscanner erwiesen sich insbesondere neuronale Netze als sehr gut geeignet. Dabei wurden verschiedene Arten von neuronalen Netzen untersucht, von denen 80% für die Erkennung der Schraubenkupplung eingesetzt werden können. Von diesen Netzen erfolgte ein Vergleich der Rechenzeit, die für die Auswertung eines Bildes notwendig ist. Dabei zeigten sich Unterschiede von mehr als dem Vierfachen. Die Versuche am Verschiebebahnhof Linz zeigten, dass die Erkennung der Schraubenkupplung mittels neuronaler Netze hervorragend funktioniert. Lediglich die Positionsbestimmung weist vereinzelt Schwankungen von über $\pm 0,2 m$ auf, die sich durch ein Training mit mehr Daten reduzieren lassen.

Um die Geschwindigkeit der Güterwagen während des Entkuppelns zu messen gibt es verschiedene Ansätze, wie Lichtschranken, Radsensoren, Laserdistanzsensoren, Farb- oder Graustufenkameras oder Radar. In verschiedenen Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich das Radargerät der Firma Radarlux mit seiner hohen Messwerttaktrate am Besten eignet. Der zusätzliche Einsatz von Radsensoren schafft Redundanzen und ermöglicht die Richtungserkennung der vorbeifahrenden Güterwagen. Mit der Kombination von Radar und Radsensoren lässt sich eine ausreichende Genauigkeit für das Entkuppeln erzielen.

Für eine robuste Positionsbestimmung der Schraubenkupplung wurden die Messwerte der einzelnen Sensoren (Position, Geschwindigkeit) zu einem Gesamtergebnis mittels Kalman Filter fusioniert. Dieses Filter konnte Schwankungen und Ausreißer in den Messwerten ausgleichen und die Position der Schraubenkupplung auch außerhalb der Reichweite von Laserscanner und ToF-Kamera schätzen. Damit die ermittelte Position der Schraubenkupplung mit der Position der Vorrichtung in Verbindung gebracht werden kann, erfolgte die Entwicklung einer möglichst einfachen Referenziermethode. Diese Referenzierung bedient sich der geometrischen Gegebenheiten der Vorrichtung und benötigt keine zusätzlichen Hilfsmittel.

Somit sind sowohl Sensorik als auch die jeweiligen Algorithmen funktionsfähig und bedürfen nur mehr einer „Feinabstimmung“. Zum Beispiel kann der Einsatz eines zweiten Laserscanners, um 3 m in Fahrtrichtung versetzt, die Positionsbestimmung der Schraubenkupplung über den vollständigen kritischen Verfahrensweg ermöglichen.

Am Laboraufbau konnten die Demonstratoren für das Langmachen und das Entkuppeln an originalen Schraubenkupplungen und Bremsschläuchen getestet werden. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse bestätigten die Tauglichkeit der Konzepte, worauf Demonstratoren für Versuche am Verschiebebahnhof entwickelt und aufgebaut wurden.

Am Verschiebebahnhof Linz Gleis 187 konnte der Demonstrator zum Langmachen an verschiedenen Güterwagen (flach, offen, gedeckt) getestet werden. Mittels Zweiwegebagger wurde die Trennvorrichtung zu den einzelnen Trennstellen auf einer Strecke von zirka 250 m transportiert. In allen Fällen funktionierte das Aufschrauben sehr zuverlässig, lediglich die Positionierung des Kupplungsschwengels erfordert eine sehr hohe Positionsgenauigkeit der Vorrichtung. Außerdem ist das Konzept zur Öffnung der Bremsschläuche noch nicht ausreichend zuverlässig. Für die Entwicklung eines Prototyps müssen diese Konzepte noch optimiert werden, um eine ausreichende Robustheit der Trennvorrichtung zu erhalten. Mögliche Ansätze hierzu existieren bereits und werden im Zuge des Folgeprojekts roboCOUPLING (Start zirka 2. Quartal 2019) umgesetzt.

Der Einbau des Demonstrators, um Schraubenkupplungen an fahrenden Zügen zu entkuppeln, fand ebenfalls am Verschiebebahnhof Linz Gleis 187 zirka 100 m vor der Bergkuppe statt. Dabei wurde besonders auf den Arbeitnehmerschutz durch Trittschutzbleche, Markierungen, Splitterschutz et cetera Wert gelegt. Im ersten Schritt erfolgte die Überprüfung der Forderungen der Anforderungsliste. Diese werden erfüllt und zum Teil übertroffen. So lassen sich bei einer Zuggeschwindigkeit von bis zu $2,2 \frac{m}{s}$ (gefordert $2 \frac{m}{s}$) Güterwagen entkuppeln. Anhand der Versuche an verschiedenen Zügen mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten konnten einige Schwachstellen der mechanischen Ausführung festgestellt werden. So erwies sich zum Beispiel die Bruchkraft der Stangen des Kniehebels als zu gering. Die Schwachstellen betreffen nur wenige Aspekte der Trennvorrichtung und sind mit geringem Aufwand behebbar. Ein automatisches Aushängen der Schraubenkupplung aus dem Zughaken ist somit möglich und die entsprechende Vorrichtung ist bereits relativ ausgereift.

Besonders für die Entwicklung eines funktionstüchtigen Prototyps für das Langmachen ist die Betrachtung der Bewegung der Trennvorrichtung entlang des stehenden Zuges und die Positionierung zur Schraubenkupplung noch ein besonders entscheidender Faktor. So muss eine möglichst einfache, kostengünstige und gleichzeitig robuste Möglichkeit gefunden werden, damit die Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Besonders aufwändig ist die Behandlung von Zügen auf allen Gleisen der Einfahrgruppe (Wien Zentralverschiebebahnhof: 15 Gleise) bei Gleislängen von bis zu 750 m. So müssen entweder entsprechend viele Trennvorrichtungen eingesetzt werden (zirka acht Stück) oder die Trennvorrichtungen zwischen den Gleisen wechseln (mindestens vier Stück). Der Wechsel der Gleisabschnitte ist aber wiederum mit einem erheblichen logistischen Aufwand und dem Einbau von Querungsmöglichkeiten verbunden. Diese Problematik in Verbindung mit den zulässigen Investitionskosten von 1.050.000 € zeigt, dass sich die Suche nach einer passablen Lösung äußerst schwierig gestaltet. Allerdings existieren bereits verschiedene Ideen und Konzepte, die im Folgeprojekt roboCOUPLING weiterentwickelt und umgesetzt werden.

Im Gegensatz dazu ist der Übergang des Demonstrators für das Entkuppeln zu einem Prototyp nur mit kleineren Anpassungen verbunden. So sind höhere zulässige Geschwindigkeiten mit diesem Konzept durchaus vorstellbar. Im Folgeprojekt roboCOUPLING erfolgt die Entwicklung eines marktreifen Prototyps, mit den notwendigen Feinabstimmungen, Dauertests et cetera.

Zurzeit beschäftigen sich einige Eisenbahnunternehmen (SBB,...) mit der Automatisierung des Güterverkehrs. So wurden von SBB 2018 unter anderem 105 Güterwagen mit automatischen Kupplungen ausgestattet, die allerdings keinen Mischbetrieb zulassen. Noch im Jahr 2019 soll ein Testbetrieb an fünf Terminals des kombinierten Verkehrs in der Schweiz starten. Diese Bemühungen könnten die Verwendung einer automatischen Trennvorrichtung für Schraubenkupplungen in Zukunft überflüssig machen. Allerdings ist ein flächendeckender Einsatz einer automatischen Kupplung in Europa noch in weiter Ferne.

Abschließend wird festgehalten, dass sowohl das Konzept für das Langmachen, als auch das Konzept für das Entkuppeln für den Einsatz am Verschiebebahnhof geeignet ist. Somit steht einer automatischen Trennung der Schraubenkupplung in Zukunft nichts im Wege.

BEGRIFFSERKLÄRUNG

Abrollberg	Eine kleine Erhebung, über die die langgemachten Güterwagen geschoben und in der Regel entkuppelt werden. Hier erfolgt die endgültige Trennung.
Einfahrgleise	Gleise in denen die Güterwagen zu Beginn des Verschubs abgestellt, kontrolliert und für etwaige Trennungen vorbereitet werden.
Entkuppeln	Aushängen der Schraubenkupplung aus dem Zughaken.
Langmachen	Aufschrauben der Schraubenkupplung, plus Nebentätigkeiten.
Lösezug	Ein seitlich an den Güterwagen angeordneter Griff, der gezogen die Bremsen entlüftet.
Richtungsgruppe / Richtungsgleise	Hier werden die Güterwagen, entsprechend ihrer Zieldestinationen wieder zusammengefasst.
Trennen	Umfasst den gesamten Vorgang zum Trennen von Güterwagen (Langmachen und Entkuppeln).
Trennstelle	Jene Position an der die Güterwagen getrennt werden.
Verschiebersteig	Befestigter Gehweg neben dem Gleis für das Verschubpersonal.
Verschub	Umfasst einen Großteil der Tätigkeiten auf einem Verschiebebahnhof (Trennen, Verbinden, Bremsprobe et cetera).
Versorgt	Das entsprechende Element (Schraubenkupplung, Bremschlauch,...) befindet sich in der vorgesehenen Halterung.
Wagenladungs- verkehr	Der Transport einzelner Güterwagen, die für den Transport zusammengefasst werden.
Zweiwegebagger	Ein Bagger, der sowohl im Gelände als auch auf Schienen fahren kann.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AK	Automatische Kupplung
C-AKv	Compact - Automatische Kupplung vereinfacht
CCD	Charge-Coupled Device
DB	Deutsche Bahn
EisbAV	EisenbahnarbeitnehmerInnenschutzverordnung
EisbBBV	Eisenbahnbau- und Betriebsverordnung
EisbG	Eisenbahngesetz
EisbSV	Eisenbahnschutzvorschrift
ERRI	Forschungs- und Versuchsamt der UIC
ETR	Eisenbahntechnische Rundschau
FFT	Fast Fourier Transformation
LkE	Lösungskonzept Entkuppeln
LkL	Lösungskonzept Langmachen
OSShD	Organisation für die Zusammenarbeit der Eisenbahnen
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SA-3	Sowjetische Automatikkupplung, dritte Variante
SK	Schraubenkupplung
SOK	Schienenoberkante
ToF	Time-of-Flight
UIC	Internationaler Eisenbahnverband
Z-AK	Zug - automatische Kupplung
1DKK	Eindimensionale Kreuzkorrelation
2DKK	Zweidimensionale Kreuzkorrelation

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Schraubenkupplung und Puffer	1
1.2	Standardschraubenkupplung [vgl. 1, S.14]	2
1.3	Systemskizze der Z-AK mit allen Komponenten [7, S.223]	4
1.4	Schematische Skizze des Ablaufes am Abrollberg [18]	8
1.5	Richtungsgruppe Zentralverschiebebahnhof Wien [19]	8
1.6	Aufschrauben der Schraubenkupplung [19]	9
1.7	Typische Wagenentkupplung am Abrollberg [19]	11
2.1	Patentskizze: DE 3344979 C2 [vgl. 31, S.11]	17
2.2	Patentskizze: DE 3344979 C2, Seitenansicht einer Förderkatze [vgl. 31, S.11]	18
2.3	Patentskizze: DE 3344979 C2, Gleisanlage [vgl. 31, S.10]	18
2.4	Patentskizze: DE 3819388 A1 [vgl. 32, S.10]	21
2.5	Patentskizze: DE 3819388 A1, Varianten Effektor [vgl. 32, S.11, S.14]	22
2.6	Patentskizze: DE 4015878 A1 [vgl. 33, S.8]	24
2.7	Versuchsaufbau [24, S.250ff] auf Basis von [32]	25
2.8	Patentskizze: DE 19621651 C2 [vgl. 34, S.6]	27
2.9	Patentskizze: EP 3095665 B1 [vgl. 35, S.6]	29
2.10	Patentskizze: EP 3095666 B1 [vgl. 36, S.9]	30
3.1	Indirekt wirkende Druckluftbremse (selbsttätig) [S. Plett: Einführung in die Technik der Bremsen, zit. n. 37, S.110]	34
3.2	Beispiel für einen Lösezug (Markierung) [vgl. 38]	35
3.3	Weitere Anordnungen von Lösezügen	35
3.4	Sonderfälle von Lösezügen	35
3.5	Berner-Raum (rote Markierung) [vgl. 39, S.11], Position der Schraubenkupplung und der Puffer an Güterwagen [vgl. 40, S.50], Maße in [mm]	38
3.6	Verschiedene Aufnahmen des Kupplungsbereiches und des Berner-Raumes	39
3.7	Weitere Aufnahmen des Kupplungsbereiches	39
3.8	Schematische Skizze des Neigungskoeffizienten	40
3.9	Vereinfachte Skizze der Begrenzungslinie G1 und der Sicherheitsabstände zwischen 2 Gleisen, Maße in [mm], nicht maßstäblich, [vgl. 41, S.22f]	42

3.10 Verletzung der Begrenzungslinie G1 durch Schraubenkupplung und Brems- schlauch	43
3.11 Versorgte und unversorgte Schraubenkupplung	44
3.12 Bild eines Zughakens (problematische Geometrie siehe Markierung)	45
3.13 Skizze der Kupplungsschwengelarten, Maße in [mm]	46
3.14 Zulässige Sicherungspositionen von Kupplungsschwengeln	46
3.15 Sonderfälle Kupplungsschwengel	47
3.16 Maße der Schraubenkupplung (in [mm]), Zughaken / Kupplungsbolzen [1, S.16ff]	47
3.17 Maße der Schraubenkupplung (in [mm]), Kupplungsbügel / Kupplungs- spindel [1, S.20ff]	48
3.18 Maße der Schraubenkupplung (in [mm]), Kupplungsglasche / Kupplungs- mutter / Kupplungsschwengelhalter [1, S.19ff]	48
3.19 Abmessungen eines typischen Brems Schlauches [vgl. 42]	49
3.20 Darstellung der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten der Bremschläu- che [vgl. 43, S.36]	50
4.1 Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221, 1993 zit. n. 44, S.18]	51
4.2 Hauptarbeitsschritte zum Aufstellen der Anforderungsliste [44, S.326] . . .	52
4.3 Ebenes Starrkörpermodell der Schraubenkupplung	57
4.4 Öffnungskraft für das Langmachen (Kupplungsschwengelhalter / Kupp- lungsschwengel)	58
4.5 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des Entkupplungsvorganges	59
4.6 Weg-Zeit-Diagramm und Anordnung von Sensorik und Trennvorrichtung .	60
4.7 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des Teilschrittes: Aushängen der Schrau- benkupplung	63
4.8 Weg-Zeit-Diagramm des Teilschrittes: Aushängen der Schraubenkupplung .	63
5.1 Arbeitsschritte beim Konzipieren [Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 7. Aufla- ge, 2007 zit. n. 48, S.60]	75
5.2 Funktionsstruktur Langmachen	77
5.3 Wirkprinzipien zur Öffnung der Bremschläuche	78
5.4 Wirkprinzipien für die Positionierung des Kupplungsschwengels	78
5.5 Wirkprinzipien für das Aufschrauben der Schraubenkupplung	79
5.6 Auswahlliste der Wirkstrukturen für das Langmachen	83
5.7 Funktionsstruktur Entkuppeln	84
5.8 Wirkprinzipien für das Fassen der Schraubenkupplung	85
5.9 Wirkprinzipien für das Anheben der Schraubenkupplung	85

5.10	Auswahlliste der Wirkstrukturen für das Entkuppeln	88
5.11	Erweiterung des Wirkprinzips, Schraubenkupplung aufschrauben	90
5.12	Lösungskonzept 1, Langmachen	91
5.13	Lösungskonzept 2, Langmachen	92
5.14	Lösungskonzept 3, Langmachen	93
5.15	Detaillierung Aushängeplatte	94
5.16	Aushängeplatte in Kontakt mit der Schraubenkupplung	94
5.17	Lösungskonzept 2, Entkuppeln, detailliert	95
5.18	Lösungskonzept 3, Entkuppeln	96
5.19	Lösungskonzept 4, Entkuppeln	97
5.20	Stärke-Diagramm	99
5.21	Finales Lösungskonzept Entkuppeln	100
5.22	Modell Entkupplungsmechanismus	100
5.23	Erforderliche Kraft für das Hochklappen, in Abhängigkeit von α ($0,5^\circ$ bis 10°)	103
6.1	Beispiel für einen Radsensor [51]	109
6.2	Bild eines Radargeräts und Beispiel des Signalverlaufs	110
6.3	Lasertriangulation und Laserdistanzsensor	111
6.4	Darstellung des Prinzips der Laser-surface-velocimetrie und Laser-surface-velocimeter	115
6.5	Graphische Darstellung der Funktionsweise des Pulslaufzeitverfahrens	116
6.6	Tiefenbild einer ToF-Kamera und ToF-Kamera	117
6.7	Aufnahme eines Laserscanners und Laserscanner	118
7.1	Zwei um Δt versetzte ähnliche Signale	124
7.2	Anordnung der Laserdistanzsensoren	124
7.3	Signale einer Messung mit Laserdistanzsensoren (Zuggeschwindigkeit zirka $2 \frac{m}{s}$)	125
7.4	Ergebnis der eindimensionalen Kreuzkorrelation	127
7.5	Bild eines vorbeifahrenden Güterwagens	128
7.6	Spektrum des Originalbilds und nach Anwendung der Fensterfunktion (Gauß, $\sigma = 0,5$)	129
7.7	Ergebnis der zweidimensionalen Kreuzkorrelation	130
7.8	Ausschnitt der Aufnahme in Abbildung 7.6	130
7.9	Ergebnis der zweidimensionalen Kreuzkorrelation, optimiert	131
7.10	Ermittelte Geschwindigkeit einer Radarmessung	132
7.11	Lichtschnittverfahren	133
7.12	Darstellung Schwellenwertelement	134

7.13	Allgemeiner Aufbau eines r-schichtigen Perzeptrons [63, S.44]	135
7.14	Aufbereitete Aufnahme der ToF-Kamera für die neuronalen Netze (Volle Auflösung)	137
7.15	Blockdiagramm des Systems, Messmodells und des diskreten Kalman-Filters [65]	140
7.16	Verlauf der ermittelten Parameter und des Sensorfusionsergebnisses (x, v, a)	142
7.17	Detailausschnitt von Abbildung 7.16	143
7.18	Aufnahmen des hochgeklappten Kniehebels, ToF-Kamera, Referenzierung .	144
7.19	Skizze: Winkel- & Positionsbestimmung (Sicht von Oben), ToF-Kamera . .	145
7.20	Skizze: Winkelbestimmung (Seitenansicht), ToF-Kamera	146
8.1	Versuchsaufbau mit originalen Bauteilen von Güterwagen (Schraubenkupplung, Bremsschläuche, Puffer)	147
8.2	Versuchsaufbau mit Demonstratoren für das Langmachen und Entkuppeln [vgl. 43, S.28]	148
8.3	Übersicht Labordemonstrator Langmachen, Maße in [mm], [vgl. 43, S.15,34], [vgl. 35]	149
8.4	Detail: Kupplungsschwengel positionieren, Maße in [mm], [vgl. 43, S.30] . .	150
8.5	Oben liegender Kupplungsschwengel, Schraubenkupplung leicht aufgeschraubt	151
8.6	Aufnahmen Feldtest Langmachen	152
8.7	Positionierung Kupplungsschwengel, Feldtest	153
8.8	Labordemonstrator Entkuppeln	154
8.9	Beispiel für eine einseitig aufgeschraubte Schraubenkupplung	155
8.10	Felddemonstrator Entkuppeln	156
8.11	Anordnung der Sensoren, Felddemonstrator Entkuppeln	157
8.12	Positions- und Geschwindigkeitsverlauf einer Simulation	158
8.13	Detailausschnitt von Abbildung 8.12, Positions- und Geschwindigkeitsverlauf einer Simulation	159
8.14	Kräfteverlauf von Simulation und Messung	159
8.15	Aufgetretene Probleme beim automatischen Entkuppeln	162
8.16	Aufgetretene Probleme beim automatischen Entkuppeln, Stangenbruch . .	163

TABELLENVERZEICHNIS

1.1	Daten der Verschiebebahnhöfe Wien und Linz [20], [21]	9
1.2	Statistik Unfallgeschehen beim Rangieren, Schweiz [vgl. 22, S.21]	12
2.1	Übersicht der analysierten Patente	32
3.1	Ergebnisse von Messungen an Güterwagen, Maße in [mm], gemessene Güterwagen: 37	40
4.1	Übersicht Automatisierungsgrade und Zeithorizont	55
4.2	Anteil an manuellen Eingriffen je Tätigkeit	56
4.3	Notwendige Öffnungskraft Langmachen	58
4.4	Zeitdauer und Kosten der aktuellen Situation, Langmachen	64
4.5	Übersicht prozessbestimmende Parameter, automatisches Langmachen . . .	65
4.6	Geschätzte zeitliche Dauer der automatischen Abläufe	66
4.7	Zeitdauer und Kosten der aktuellen Situation, Entkuppeln	66
4.8	Anforderungsliste für die automatische Trennvorrichtung	74
5.1	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Trennvorrichtung antreiben	80
5.2	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Bremschläuche öffnen	81
5.3	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Kupplungsschwengel positionieren .	81
5.4	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung aufschrauben (Teil 1)	81
5.5	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung aufschrauben (Teil 2)	82
5.6	Morphologischer Kasten Langmachen	82
5.7	Auflistung der Lösungskonzepte (Wirkstrukturen) für das Langmachen . .	82
5.8	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Trennvorrichtung positionieren . .	86
5.9	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung fassen	86
5.10	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung anheben (Teil 1)	86
5.11	Vor- und Nachteile der Wirkprinzipien, Schraubenkupplung anheben (Teil 2)	87
5.12	Morphologischer Kasten Entkuppeln	87
5.13	Auflistung der Lösungskonzepte (Wirkstrukturen) für das Entkuppeln . . .	88
5.14	Technische Bewertung der detaillierten Lösungskonzepte	97

5.15	Wirtschaftliche Bewertung der detaillierten Lösungskonzepte	98
5.16	Bezeichnung der Parameter	101
6.1	Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung (Teil 1)	119
6.2	Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung (Teil 2)	120
6.3	Überblick der Vor- und Nachteile der Sensoren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung	120
6.4	Wertskala der quantifizierbaren Bewertungskriterien	120
6.5	Bewertung der Sensoren für die Geschwindigkeitsmessung	121
6.6	Bewertung der Sensoren für die Objekterkennung und Positionsbestimmung	122
7.1	Auswirkungen der Auflösungsreduktion auf die neuronalen Netze (Intel Core i5 2,7 GHz / Autoencoder / Bildaufbereitung (a) / 5618 Trainingsbilder)	137
7.2	Fehleranteil Autoencoder, Bildaufbereitung (a)	138
7.3	Vergleich der Fehleranteile der verschiedenen neuronalen Netze	138
7.4	Vergleich der Rechenzeit der unterschiedlichen Netze für die Auswertung eines Bilds (Intel Core i5 2,7 GHz)	139
7.5	Bezeichnung der Parameter, nach [64] und [65]	140
7.6	Gleichungen des Kalman-Filters, nach [64] und [65]	140

LITERATUR

- [1] ÖNORM EN 15566:2011-02 *Bahnanwendungen - Schienenfahrzeuge - Zugeinrichtung und Schraubenkupplung*.
- [2] H. Stuhr. “Untersuchung von Einsatzszenarien einer automatischen Mittelpufferkupplung”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Juni 2013), S. 17–21.
- [3] U. Spillner. “Quo vadis, Schienen-Güterverkehr?” In: *Güterbahnen 2* (2013), S. 8–11.
- [4] M. Egger; C. Zellner; B. Stadlmann; F. Saliger; P. Traussenegger; J. Zajicek; F. Michelberger. “Automatisches Trennen von Güterwagen mit Schraubenkupplung”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 09 (2018), S.136–S.140.
- [5] U. Martin; N. Neuberg; C. von Molo; K. Ji; M. Körner. “Automatische Mittelpufferkupplung mit elektrischer Leitungserbindung - Perspektiven für EIU und EVU”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 11 (2015), S. 31–34.
- [6] B. Sünderhauf. *Die Automatische Mittelpufferkupplung (AK)*. ALTAPLAN LEASING GmbH, 2009.
- [7] E. Hoffmann. “Zulassungsversuche mit der automatischen Zugkupplung (Z-AK)”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Apr. 2000), S. 222–230.
- [8] P. Molle; H. Friedrichs. “Die automatische Kupplung in Europa Stand der Entwicklung”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Apr. 1992), S. 217–214.
- [9] G. Stieler; A. Schelle. “Die automatische Zugkupplung - ein neuer Weg zur Ablösung der konventionellen Schraubenkupplung”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (Mai 1992), S. 321–327.
- [10] H. Stuhr. “Untersuchung von Einsatzszenarien einer automatischen Mittelpufferkupplung”. Diss. TU Berlin, 2013.
- [11] S. Hagenlocher. *Automatische Kupplungssysteme im Schienengüterverkehr - eine Übersicht*. Techn. Ber. hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH, 2015.
- [12] R. Jahncke; R. Bänsch; J. Kohlschütter. “Zukunftsfähige Güterwagen: Revolution statt Evolution”. In: *Eisenbahn Ingenieur Kompendium* 01 (2019), S. 71–78.

-
- [13] *Das System Schiene im Blick*. Techn. Ber. Technischer Innovationskreis Schienengüterverkehr, Okt. 2018.
- [14] K. Zapp. “Das Ziel klar im Blick”. In: *Rail Business Spezial* (Mai 2018), S. 25–26.
- [15] Interview mit Malte Lawrenz (Vorsitzender des Verbands der Güterwagenhalter in Deutschland e.V.) “Zwingend notwendig, aber ...” In: *Rail Business Spezial* 24 (Mai 2018).
- [16] L. Meyer. “Weiterentwicklung von SBB Cargo”. In: *cargo* 1 (2018), S. 11.
- [17] *Netzkarte*. ÖBB Infrastruktur AG. 2018.
- [18] C. Lindecke. *Schema Ablaufberg*. 2016-12-20. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5953334>.
- [19] ÖBB Infrastruktur AG, Praterstern 3, 1020 Wien.
- [20] *Wien Zentralverschiebebahn*. ÖBB Infrastruktur AG. Sep. 2012.
- [21] T. Kürnsteiner. *Linz Vbf - Lageskizze*. ÖBB Infrastruktur AG. 2018.
- [22] *Bericht über die Sicherheit im öffentlichen Verkehr 2014*. Bundesamt für Verkehr BAV.
- [23] C. Zellner; B. Stadlmann; M. Egger; M. Hattinger. “Automatisiertes Trennen von Schraubenkupplungen im Verschub”. In: *Tagungsband IRSA*. 2017.
- [24] H. Rake; W. Schwanhaeüßer; F. Frederich; M. Enning. “Automatisierung von Ablaufanlagen mit dem Kupplungsroboter”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 04 (1993), S. 249–254.
- [25] A. Carrillo Zanuy; J. Juan Gimeno. “Das COS-BOT-System, ein theoretisches Konzept zur Automatisierung in Eisenbahn-Terminals”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 01 (2015), S. 50–53.
- [26] E. Jänsch. “Ein Roboter im Berner Raum”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 01 (2015), S. 54–55.
- [27] J. Duchemin. “Automatische Kupplung für den Schienengüterverkehr”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 05 (2009), S. 270–271.
- [28] A. Schelle. “Die automatische Zugkupplung der UIC”. In: *Eisenbahningenieur* 48 (1997), S. 56–60.
- [29] W. Schwanhäüßer; A. Müller. “Die Integration von Entkupplungsrobotern in den Ablaufbetrieb”. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 10 (1995), S. 697–703.
- [30] W. Lorenz. “Güterverkehr - Zukunftschance durch Automatisierung”. In: *Eisenbahningenieur* 45 (1994), S. 395–399.

- [31] E. Huber. *Rangieranlage für Schienenfahrzeuge*. DE 3344979 C2. Dez. 1983.
- [32] M. Bruns; F. Frederich; M. Hecht; J. Hock; T. Kimpel; H.D. Müller; H. Rake; W. Schwanhäuser; K. Walther. *Einrichtung und Verfahren zum automatischen Trennen von Güterwagen mit Schraubenkupplungen*. DE 3819388 A1. Juni 1988.
- [33] M. Bruns; M. Enning; T. Kimpel; H. Rake; W. Schwanhäuser; K. Walther. *Einrichtung zum vollautomatischen Trennen von Güterwagen mit automatischen Kupplungen*. DE 4015878 A1. Mai 1990.
- [34] J. Cappelletti; S. Zakaria. *Vorrichtung zum Abkuppeln von Schienenfahrzeugen*. DE 19621651 C2. Mai 1996.
- [35] P. Harrer; M. Hattinger; M. Pachler; C. Zellner; M. Egger; B. Stadlmann; G. Zauner. *Vorrichtung zum Langmachen einer Schraubenkupplung*. EP 3095665 B1. Apr. 2016.
- [36] P. Harrer; M. Hattinger; M. Pachler; C. Zellner; M. Egger; B. Stadlmann; G. Zauner. *Vorrichtung zum Entkuppeln einer langgemachten Schraubenkupplung*. EP 3095666 B1. Apr. 2016.
- [37] J. Ihme. *Schienenfahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, 2016.
- [38] C. Zellner; B. Stadlmann; M. Egger; M. Hattinger; F. Michelberger; J. Zajicek. “Automated handling of a screw coupling of freight wagons”. In: *TRA*. 2018.
- [39] Kommission der Europäischen Gemeinschaften. “Berichtigung der Entscheidung 2004/446/EG...” In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 155 (2004).
- [40] *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. Techn. Ber. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Juli 2017.
- [41] *ÖNORM EN 15273-2:2012-11 Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 2: Fahrzeugbegrenzungslinien*.
- [42] *Bremskupplung A91603*. Techn. Ber. Knorr-Bremse, 2002.
- [43] M. Hattinger. *Automatisiertes Langmachen von Güterzügen*. Diplomarbeit. 2017.
- [44] J. Feldhusen; K.-H. Grote. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 8. Aufl. Springer Vieweg, 2013.
- [45] *Ausbildung zum/zur VerschieberIn*. 2018-09-13. ÖBB Infrastruktur AG. URL: oebb.csod.com/ats/careersite/JobDetails.aspx?site=1&id=21.
- [46] *Eisen- und metallverarbeitende Gewerbe, Nebenkosten*. KMU Forschung Austria - Austrian Institute for SME Research. Jän. 2018.
- [47] *Güterwagen und innovative Transport- und Umschlagslösungen der Rail Cargo Group*. Rail Cargo Group AG. Feb. 2015.

-
- [48] P. Naefe. *Einführung in das Methodische Konstruieren*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2012.
- [49] J. Adamy. *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2014.
- [50] K. Reinschke. *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2014.
- [51] *Wheel detection - Wheel Sensor RSR110*. Frauscher Sensortechnik GmbH. Dez. 2016.
- [52] Radarlux Radar Systems GmbH.
- [53] E. Hering; G. Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Vieweg+Teubner, 2012.
- [54] *DT35-B15251 MID-RANGE-DISTANZSENSOREN*. SICK AG. Dez. 2015.
- [55] M. Löffler-Mang. *Optische Sensorik*. Vieweg+Teubner, 2012.
- [56] *Grundlagen der Velocimetrie*. 2018-08-21. Polytec GmbH. URL: www.polytec.com/de/velocimetrie/technologie.
- [57] *PROSPEED LASER-BASIERTE ENCODER*. 2018-08-22. Polytec GmbH. URL: www.polytec.com/de/velocimetrie/produkte/kompaktvelocimeter/lsv-2100-laser-surface-velocimeter.
- [58] *FOTONIC E-SERIES*. Fotonic i Norden AB. 2015.
- [59] *LMS511-22100 Heavy Duty*. SICK AG. Juni 2016.
- [60] R. Hoffmann; M. Wolff. *Intelligente Signalverarbeitung Teil 1*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2014.
- [61] W. Yutao; W. Dayang; Y. Gang. "A New Method for Particle Velocity Measurement Based on Fast Algorithm for Cross-correlation and Filter Interpolation". In: *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang. 2013.
- [62] W. Burger; M. J. Burge. *Digitale Bildverarbeitung - Eine algorithmische Einführung mit Java*. 5. Aufl. Bd. 3. Springer Vieweg, 2015.
- [63] R. Kruse; C. Borgelt; C. Braune; F. Klawonn; C. Moewes; M. Steinbrecher. *Computational Intelligence*. 2. Aufl. Springer Vieweg, 2015.
- [64] R. Marchthaler; S. Dingler. *Kalman-Filter (Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme)*. Springer Vieweg, 2017.
- [65] Mohinder S. Grewal; Angus P. Andrews. *Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB*. 3. Aufl. J. Wiley & Sons, 2008.

-
- [66] P. Balzer. *Das Kalman Filter einfach erklärt*. 2018-08-15. URL: www.cbccity.de/das-kalman-filter-einfach-erklart-teil-2.
- [67] U. Höft. *Mehr Güter auf die Schiene! Aber wie?* Techn. Ber. Bahn Media Institut für Management, Qualität und Verkehrsmittelreinigung / Technische Hochschule Brandenburg, Mai 2016.
- [68] A. Jacobi. “Kuppeln leicht gemacht”. In: *cargo 3* (2018), S. 16–17.
- [69] C. Zellner; B. Stadlmann; M. Egger; F. Michelberger; J. Zajicek. “Automatisierung im Verschiebebahnhof”. In: *Jahrbuch der Logistikkforschung* (2017).
- [70] *Rail Cargo Group Ihr Partner in Europa, ÖBB-Güterverkehr in Zahlen*. Techn. Ber. Rail Cargo Group, Dez. 2016.
- [71] A. Schirmer; M. Aho. *ATTACHMENT DEVICES FOR REAR-END SIGNALS, CLEARANCE FOR DRAW HOOKS, SPACE FOR SHUNTING STAFF OPERATION, FOOTSTEPS AND HANDRAILS*. Techn. Ber. 1.3. European Railway Agency, 2014.
- [72] L. Li. *Time-of-Flight Camera - An Introduction*. Techn. Ber. Texas Instruments, 2014.
- [73] *Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung (EisbAV)*. Juli 2012.
- [74] K.H. Aust; P. Faubel. *Verfahren zum Ermitteln des Kupplungszustands einer Eisenbahnkupplung, Eisenbahnkupplung [!] sowie Anordnung mit einer Eisenbahnkupplung*. DE 102008034018 B3. Juli 2008.
- [75] H. B. Mitchell. *Multi-Sensor Data Fusion*. Springer, 2007.
- [76] E. Kiel. *Antriebslösungen*. Springer, 2007.
- [77] E. Beule. *Einrichtung zum Automatisieren des Rangierbetriebes von Schienenfahrzeugen*. DE 4302377 C2. Jän. 1993.
- [78] Archipow; P. Fjodorowitsch; N. Tagil. *Verfahren zum Entkuppeln von Schienenfahrzeugen mit automatischen Kupplungen*. DE 2249421 A1. Okt. 1972.

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Christoph Zellner
Geburtsdatum: 27.04.1990
Geburtsort: Braunau/Inn
Staatsangehörigkeit: Österreich

AUSBILDUNG (SCHULE / STUDIUM)

2016 - 2019 **TU Wien, Doktoratsstudium Maschinenbau**
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
Dissertation: *Automatische Trennvorrichtung für Güterwagen*

2010 - 2015 **FH-Wels, Automatisierungstechnik, Bachelor / Master**
Schwerpunkt: Automatisierte Anlagen
Masterarbeit: *Auswertung von Bildinformation eines 3D-Kamerasystems mittels einer automatisierten Softwarelösung*
Bachelorarbeit: *Implementierung eines Energiespeichersystems (Supercap) zur Rekuperation der Bremsenergie von Shuttlefahrzeugen für Lagersysteme*

2004 - 2009 **HTBLA Braunau, Mechatronik**
Ausbildungsschwerpunkt: Automatisierung

BERUFSERFAHRUNG / PRAKTIKA

Seit 02/2019 **B&R Industrial Automation GmbH, Eggelsberg**
Projektmanager, Department System Software

10/2015 - 11/2018 **FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels**
Projekt: *Entkupplungsroboter (EntKuRo)*, Entwicklung einer automatischen Vorrichtung zur Trennung von Schraubenkupplungen an Güterwagen

04/2013 - 06/2015 **TGW Mechanics GmbH, Wels** (Diverse Praktika)

PATENTE (MITERFINDER)

EP3095665B1 Vorrichtung zum Langmachen einer Schraubenkupplung
EP3095666B1 Vorrichtung zum Entkuppeln einer langgemachten Schraubenkupplung