

Institut für Mess- und Regelungstechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Nr. 005

Dipl.-Ing. Alexander Geistler

Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren



Alexander Geistler

**Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit
Wirbelstrom-Sensoren**

Schriftenreihe
Institut für Mess- und Regelungstechnik,
Universität Karlsruhe (TH)

Band 005

Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeu- gen mit Wirbelstrom-Sensoren

von
Alexander Geistler



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Maschinenbau, 2006

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2006
Print on Demand

ISSN: 1613-4214
ISBN: 978-3-86644-123-1

Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte

Dissertation

von

DIPL.-ING. ALEXANDER GEISTLER

aus Düren

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. C. Stiller
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. D. Abel
Tag der mündlichen Prüfung:	8.11.2006

Diese Seite bleibt frei

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT) der Universität Karlsruhe (TH). Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Stiller, danke ich sehr herzlich für die Betreuung dieser Arbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre am Institut, die stets viel Freiraum für die Verwirklichung eigener Ideen gelassen hat. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. em. Dr.-Ing. F. Mesch für sein großes Interesse an dem von mir bearbeiteten Forschungsthema, die wertvollen Anregungen und die interessanten Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Abel gilt mein Dank sowohl für die Übernahme des Korreferats als auch für die interessante Zusammenarbeit im Rahmen des GMA-Fachausschusses 7.61. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Furmans danke ich für die angenehme Gestaltung der Prüfung.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn MSc. F. Böhringer, der sich zusammen mit mir über etliche Jahre hinweg mit der Ortung von Schienenfahrzeugen wissenschaftlich auseinandergesetzt hat, für die vielen gemeinsamen Diskussionen, Dienstreisen, Messfahrten und Veröffentlichungen, die einen wesentlichen Eckpfeiler der vorliegenden Arbeit bilden. Des weiteren danke ich allen meinen Studien- und Diplomarbeitern sowie den wissenschaftlichen Hilfskräften, die ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) danke ich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsvorhabens *DemoOrt*. Besonders zu erwähnen ist auch die Ermöglichung der praktischen Forschungsarbeit seitens der Albtal-Verkehrsgesellschaft (AVG), Karlsruhe, die stets unbürokratisch die Durchführung vieler Testfahrten auf ihrem Streckennetz unterstützt hat. Insbesondere danke ich den Herren Dipl.-Ing. (FH) F. Ehemann, Dipl.-Ing. (FH) P. Forcher, A. Hettel und Dipl.-Ing. (FH) U. Konrath, die mir bei kleineren und größeren Anliegen immer hilfreich zur Seite standen. Für die fruchtbare Kooperation danke ich der Firma Bombardier Transportation (BT RCS); stellvertretend seien an dieser Stelle die Ingenieure Håkan Lind und Askell Finnestad erwähnt, die sich erfolgreich mit der Weiterentwicklung und Verbesserung der Wirbelstrom-Sensorik befasst haben.

Sehr herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen für das stets angenehme Arbeitsklima, bei den Mitarbeitern der Werkstätten für die großartige Unterstützung bei den Messaufbauten und bei unserem Sekretariat für die erfolgreiche Bezwingung von manchmal doch sehr umfangreichem Papierkram. Herrn Dr.-Ing. J. Horn danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und für die hilfreichen Diskussionen zu den Untersuchungen und Ergebnissen dieser Arbeit; Herrn Dr.-Ing. S. Kammel danke ich für seine kreativen Ideen und Denkanstöße, welche sich ebenfalls in dieser Arbeit wiederfinden.

Kurzfassung

Zur Realisierung einer sicherheitsrelevanten Ortung von Schienenfahrzeugen werden zunehmend bordautonome Verfahren gegenüber streckenseitigen bevorzugt, da letztere stets aufwendige und damit kostenintensive Installationen an der Strecke erfordern. Wirbelstrom-Sensoren erfüllen die Messaufgaben Geschwindigkeitsmessung und absolute Positionsmessung und ermöglichen somit die Realisierung einer rein bordautonomen Ortung von Schienenfahrzeugen. Die Geschwindigkeitsmessung basiert dabei auf zwei diversitären Verfahren, zum einen auf der Laufzeit-Korrelation und zum anderen auf der Frequenzanalyse der Sensorsignale. Durch die Fusion der Messwerte mittels eines Kalman-Filters wird insbesondere die Verfügbarkeit der Messung gesteigert.

Mit Wirbelstrom-Sensoren lassen sich Weichen und Weichenbauteile detektieren und klassifizieren. Hierfür wird ein statistisches Modell erstellt. Mit einem Bayes-Klassifikator wird anhand von Messdaten die robuste Klassifikation von Weichen gezeigt. Anhand eines geeigneten Modells der Strecken-Infrastruktur lässt sich dann der Fahrweg eines Schienenfahrzeugs gleisgenau nachvollziehen. Zur Modellierung wird ein Hidden-Markov-Modell verwendet, welches auch die statistischen Einflüsse auf die Klassifikation berücksichtigt.

Die Wirbelstrom-Sensorik besitzt wegen ihrer Vielseitigkeit die Möglichkeit, die Messgrößen Geschwindigkeit und Position redundant mit teilweise diversitären Verfahren zu bestimmen. Daher eignet sie sich besonders zum Einsatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen.

Abstract

For safety-relevant train location purposes, train-borne systems are more and more preferred, as track-related systems cause high installation effort and maintenance costs. Eddy current sensors allow the measurement of the train's velocity and its absolute position with only on-board equipment. The velocity measurement is based upon two diverse methods, correlation techniques and a frequency analysis. By fusing the measured values with a Kalman Filter, the availability of the velocity measurement is significantly increased.

With eddy current sensors, a detection and classification of turnouts and turnout components is possible. A Bayes classifier is used for a robust turnout classification, making use of a statistical signal model. With an adequate model of the railway infrastructure, the path of a vehicle through the railway network can be tracked. To handle the statistical influences on the classification, a Hidden Markov Model is used successfully.

The eddy current sensor system allows to measure velocity and position of a train with partly diverse redundant methods. Thus, it can be implemented in safety-related applications.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Motivation	1
1.1	Einführung	1
1.2	Definitionen und Begriffe	2
1.2.1	Fahrzeugortung	2
1.2.2	Bordautonome Ortung	3
1.2.3	Telematik	4
1.3	Anwendungsbeispiele	4
1.3.1	Dispositive Aufgaben	5
1.3.2	Aufgaben mit Sicherheitsverantwortung	6
1.4	Ziele und Struktur dieser Arbeit	7
2	Geschwindigkeits- und Wegmessung	9
2.1	Sensorik	9
2.1.1	Radumdrehungszähler	9
2.1.2	Berührungslose Geschwindigkeitsmessung	10
2.1.3	Inertialsensorik	12
2.1.4	Global Navigation Satellite System (GNSS)	13
2.2	Wirbelstrom-Sensorik	13
2.2.1	Außeneinheit	14
2.2.2	Inneneinheit	18
2.2.3	Störeinflüsse	21
2.3	Laufzeit-Korrelation	22
2.3.1	Funktionsprinzip	22
2.3.2	Messbetrieb	25
2.4	Frequenzanalyse	27

2.4.1	Funktionsprinzip	28
2.4.2	Fehlerbetrachtung	33
2.5	Fusion der diversitären Geschwindigkeitswerte	39
2.5.1	Systemkonzept	39
2.5.2	Messergebnisse	41
2.5.3	Mögliche Erweiterungen	45
3	Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen	47
3.1	Bauteile einer Eisenbahnweiche	48
3.2	Weichenerkennung	50
3.2.1	Analogien zur Sprachsignalverarbeitung	51
3.2.2	Konzept zur Merkmalsgewinnung	51
3.3	Detektion von Eisenbahnweichen	54
3.3.1	Signalverarbeitung	54
3.3.2	Messergebnisse	60
3.3.3	Fazit	61
3.4	Klassifikation von Eisenbahnweichen	62
3.4.1	Mustererkennung und Ähnlichkeit zwischen Signalen . . .	63
3.4.2	Beseitigung des Geschwindigkeitseinflusses	63
3.4.3	Amplitudenskalierung	64
3.4.4	Korrelation von Ortssignalen	64
3.4.5	Korrelation von Signaturen	68
3.4.6	Dynamische Zeitverzerrung	70
3.4.7	Berücksichtigung mehrerer Referenzen	73
3.4.8	Bayes'sche Signalklassifikation	76
3.4.9	Maximal erlaubter Abstand	78
3.4.10	Messergebnisse	79

4	Modellierung der Infrastruktur	91
4.1	Digitale Streckenkarte und Ereignisse	91
4.1.1	Erfassung und Wiedergabe der Netztopologie	93
4.1.2	Auswahl geeigneter Ereignisse zur Lokalisierung	100
4.2	Realisierung einer topologischen Streckenkarte	100
4.2.1	Netztopologie und Nummerierung der Weichen	101
4.2.2	Realisierung der Weichen-Referenzdatenbank	102
4.3	Klassifikation mit einfachen Markov-Ketten	102
4.3.1	Theoretische Betrachtungen	103
4.3.2	Rekursive Klassifikation mit Markov-Modellen	104
4.4	Klassifikation mit Hidden-Markov-Modellen	105
4.4.1	Theoretische Betrachtungen	107
4.4.2	Systemkonzept	108
4.4.3	Berechnung einer apriori-Wahrscheinlichkeit	113
4.4.4	Messergebnisse	115
5	Betrachtungen zu Sicherheit und Verfügbarkeit	119
5.1	Signaltechnische Sicherheit	119
5.1.1	Vertrauensintervall	119
5.1.2	Ausfalldetektion	120
5.1.3	Sicherer und gefährlicher Zustand	121
5.1.4	Prinzip der Redundanz	122
5.2	Signaltechnische Sicherheit beim WS-Sensorsystem	123
5.2.1	Gültigkeitsbereich	123
5.2.2	Redundanzen beim Wirbelstrom-Sensorsystem	123
5.3	Sicherheit im Kontext eines Ortungssystems	126
6	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	131

A	Anhang	137
A.1	Notation und Symbole	137
A.1.1	Operatoren	137
A.1.2	Abkürzungen	137
A.1.3	Symbole	138
A.2	Bestimmung einer optimalen Korrelatormesszeit	140
A.2.1	Minimale Messzeit aufgrund des Signalspektrums	140
A.2.2	Minimale Messzeit bei Verwendung eines OLC	141
A.2.3	Minimale Messzeit bei Verwendung eines CLC	142
A.3	Fusion der Geschwindigkeitswerte mittels eines Kalman-Filters	142
A.3.1	Systemmodell	143
A.3.2	Beobachtungsmodell	144
A.3.3	Das Kalman-Filter	146

1 Einführung und Motivation

Ortung und Navigation sind die wohl wichtigsten Elemente moderner Verkehrstelematik¹, hier insbesondere im Zusammenhang mit neuartigen Betriebsleitsystemen [60]. Im Schienenpersonennahverkehr (SPNV), aber auch im Schienengüterverkehr (SGV) werden immer mehr Ortungs- und Leitsysteme in Betrieb genommen, welche vor allem auf bordautonomer Informationsgewinnung aufbauen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung der bordautonomen Ortung von Schienenfahrzeugen unter Verwendung spezieller neuartiger Sensorik.

Zunächst werden die wichtigsten Begriffe der Ortung kurz definiert. Außerdem wird auf die Motivation eingegangen, Schienenfahrzeuge bordautonom zu orten, und es werden die unterschiedlichen Anwendungen von bordautonomen Ortungsverfahren anhand von Beispielen erläutert. Die wesentlichen Ziele dieser Arbeit schließen diese Einführung ab.

1.1 Einführung

Bordautonome und damit rein fahrzeugbasierte Ortungssysteme zur Ermittlung der Position eines Fahrzeugs sind bereits vielfach für dispositive Zwecke im Einsatz. Hierzu zählen z. B. rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL) sowie Fahrzeug- und Flottenmanagementsysteme für Straßen- und Eisenbahnen. Weitere technische Anwendungen sind die ortsselektive Spurkranzschmierung² und die präzise Ortung bei Gleismesszügen. Allen diesen Systemen ist gemein, dass sie für nicht sicherheitsrelevante Anwendungen konzipiert sind; ihr Ausfall stellt somit in keinem Fall eine Betriebsgefahr dar. Daher hat sich zumeist eine einfache satellitenbasierte Ortung mit dem *Global Positioning System* (GPS) bewährt, gegebenenfalls unterstützt durch weitere Sensoren, wie z. B. Radumdrehungszähler oder Beschleunigungssensoren. Die Vorteile dieser Ortungssysteme liegen vor allem in ihrem niedrigen Preis bei einer angemessenen Verfügbarkeit.

¹Telematik: Kunstwort, zusammengesetzt aus Telekommunikation und Informatik; zusammenfassend für die Erfassung, Übermittlung und Verarbeitung von Information.

²Zur Verschleißminderung bei Kurvenfahrten kann der gegen die Schiene anlaufende Teil des Rades, der Spurkranz, mit Fett geschmiert werden.

Moderne Betriebsverfahren, wie das neue europäische Zugbeeinflussungssystem ETCS/ERTMS³, verlangen allerdings nach leistungsfähigeren Systemen zur Zug-ortung, um die vorhandene Strecken-Infrastruktur besser ausnutzen zu können [49]. Im Vordergrund steht dabei in der Regel eine kontinuierliche Positionsverfolgung des Schienenfahrzeugs. Da streckenbasierte Systeme, wie z. B. die in Deutschland verwendete *Linienzugbeeinflussung* (LZB), hohe Aufwendungen für Installation und Wartung erfordern, kommen sie nur für stark belastete Hauptstrecken infrage. Um auch bei weniger bedeutenden Strecken die Leistungsfähigkeit zu verbessern, sind insbesondere hier bordautonome Ortungssysteme zu bevorzugen, da in diesem Fall die geringere Zugdichte geringere Gesamtkosten des Betriebs erfordert. Allein auf GPS und klassischer Odometrie basierende Systeme sind in der Lage, Fahrzeuge mit absoluten Genauigkeiten im Bereich weniger Meter zu orten. Allerdings wird die Forderung nach Gleisselektivität nicht oder nur selten erreicht, so dass auf zusätzliche Sensorik an der Strecke, z. B. Balisen oder Infrarot-Ortsbaken, zurückgegriffen werden muss, um einen Zug gleisgenau orten zu können. Die im Zusammenhang mit der Fahrzeugortung für die vorliegende Arbeit relevanten Begriffe sind im folgenden erklärt.

1.2 Definitionen und Begriffe

Zunächst werden einige der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe der Ortung hinsichtlich ihrer Bedeutung definiert und jeweils kurz erläutert. Dies dient zugleich als Übersicht über formal mögliche Methoden.

1.2.1 Fahrzeugortung

Unter dem Begriff Fahrzeugortung ist zunächst die Bestimmung der Position eines Schienenfahrzeugs zu verstehen. Dabei kann die Positionsangabe z. B. in Weltkoordinaten oder auch in einem anderen Bezugssystem – für Anwendungen im Schienenverkehr eignen sich besonders die Streckenkilometer – erfolgen.

Tabelle 1.1: Unter den Begriff der Ortung fallende kinematische Größen.

	Weltkoordinaten	Bezugssystem Schiene
Position	\mathbf{x}	x
Geschwindigkeit	\mathbf{v}	v
Beschleunigung	\mathbf{a}	a

³European Train Control System bzw. European Rail Traffic Management System

Die Verwendung des Bezugssystems Schiene vereinfacht das Problem der Ortung auf skalare eindimensionale Größen, wohingegen eine Positionsangabe in Weltkoordinaten eine mindestens zweidimensionale Positionsbestimmung erfordert.

1.2.1.1 Relative Positionsmessung

Bei der relativen Positionsmessung wird die Position eines Fahrzeugs relativ zu einem bekannten Referenzpunkt bestimmt, z. B. durch Wegmessung mit einem Odometer. Ohne einen bekannten Referenzpunkt ist die relative Positionsinformation praktisch wertlos. In dieser Arbeit wird in Kapitel 2 ein neuartiges Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung vorgestellt, welches die Geschwindigkeit im Gegensatz zu den gängigen Radumdrehungszählern schlupffrei misst und damit eine präzisere Positionsmessung erlaubt.

1.2.1.2 Absolute Positionsmessung

Bei der absoluten Positionsmessung wird die absolute Position eines Fahrzeugs bestimmt. Dies geschieht zumeist anhand bekannter Referenzpunkte, wie z. B. Balisen oder anderer Ortsmarkierungen. Auch ein satellitenbasiertes Ortungssystem, wie z. B. das GPS, liefert eine absolute Positionsinformation. In Kapitel 3 wird ein Verfahren vorgestellt, welches es erlaubt, Weichen als Referenzpunkte zur absoluten Positionsmessung zu verwenden.

1.2.1.3 Ortung

Die in den Positionsdaten enthaltenen Informationen müssen zur Weiterverarbeitung in einem Leitsystem bewertet werden. Hier wird in dieser Arbeit der Übergang zur Ortung verstanden, indem aus einer Positionsmessung eine Ortsinformation gewonnen wird. Im wesentlichen umfasst dies die Zuordnung einer Positionsmessung zu einem vorher definierten Ort, im Schienenverkehr in der Regel zu einem Gleis. Ein zentrales Element der Ortung ist dabei die digitale Streckenkarte, mittels derer eine Positionsinformation in eine Ortsinformation überführt werden kann. Hierauf wird in Kapitel 4 ausführlich eingegangen.

1.2.2 Bordautonome Ortung

Bei der bordautonomen Ortung wird die Ortsinformation ausschließlich durch das Fahrzeug als geschlossenes System gewonnen. Im Gegensatz zur konventionellen

streckenbasierten Ortung sind keine aktiven Einrichtungen⁴ außerhalb des Fahrzeugs erforderlich. Auch eine satellitenbasierte Ortung kann als bordautonom bezeichnet werden, da die eigentliche Ortsinformation allein im Fahrzeug gewonnen wird. Bei gängigen Ortungsverfahren arbeiten sicherheitsrelevante Systeme derzeit stets streckenbasiert; im dispositiven Bereich sind, wie in Abschnitt 1.3.1 erläutert, bordautonome Systeme bereits im Einsatz.

1.2.3 Telematik

Neben der eigentlichen Ortsinformation können zur Verwendung in Telematiksystemen weitere relevante Betriebsdaten vom Fahrzeug an die Leitstelle übertragen werden [49]:

- Dynamische Fahreigenschaften (Zug- und Bremsgewicht)
- Betriebszustände (Halt an Haltestelle, Zugtrennung bzw. -vereinigung, Störungen)
- Länge und Anzahl der mitgeführten Wagen (Zuglänge)
- Zugintegrität (Zugschlussmeldung bzw. Zugvollständigkeit)

Ortsinformation und ggf. weitere Betriebsdaten können dann von einer Leitstelle ausgewertet werden, um den momentanen Betriebszustand zu erfassen, zu kontrollieren und ggf. zu beeinflussen.

1.3 Anwendungsbeispiele

Die Fahrzeugortung spielt im Bereich des Eisenbahnwesens von jeher eine elementar wichtige Rolle. Zum einen muss sichergestellt sein, dass ein geplanter Fahrtverlauf eingehalten wird (Ortung zu dispositiven Zwecken), zum anderen wird das Zusammenstoßen von Eisenbahnfahrzeugen dadurch verhindert, dass das Freisein des zu befahrenden Streckenabschnitts sichergestellt ist (sicherheitsrelevante Ortung).

⁴Hiermit sind Bauteile und Komponenten gemeint, welche fest an der Strecke installiert Informationen aufnehmen, ggf. verarbeiten und an die zentrale Leitstelle weiterleiten.

1.3.1 Dispositive Aufgaben

Bei rein dispositiven Aufgaben der Fahrzeugortung handelt es sich in der Regel um eine Standorterfassung zur Fahrzeug- und Zugdisposition. Eine falsche Ortsinformation kann sich nicht sicherheitskritisch auswirken. Anwendungsbeispiele sind die Fahrzeugdisposition sowie die Kunden- und Fahrerinformation. In den Betriebsablauf wird nicht unmittelbar eingegriffen.

Fahrzeugmanagement Bei Eisenbahnbetrieben ist die Information über den Standort von Fahrzeugen eine wichtige Information zur Planung der Betriebsabläufe. Eine dynamische Ortung kann den Disponenten wesentlich bei der Einteilung der Fahrzeuge unterstützen. So kann z. B. die Einhaltung von Wartungsintervallen gut überwacht und gesteuert werden, wenn jederzeit der Standort angeforderter Fahrzeuge ermittelt werden kann.

Rechnergestütztes Betriebsleitsystem (RBL) Ein rechnergestütztes Betriebsleitsystem erfüllt im wesentlichen zwei Anforderungen: Zum einen bietet es dem Disponenten einen Überblick über die aktuelle Betriebssituation und somit über den Fahrzeugeinsatz sowie den aktuellen Standort aller Fahrzeuge, die zu diesem Zeitpunkt unterwegs sind. Zum anderen werden die Kunden über den jeweiligen Standort des Fahrzeugs informiert. Im Zug wird die folgende Haltestelle angezeigt; Fahrgäste, die an der Haltestelle warten, erfahren die Dauer bis zum Eintreffen der nächsten Bahn.

Online-Trassenmanagement Was im Straßenverkehr gang und gäbe ist, scheint bei der Eisenbahn von heute unmöglich: Die Vergabe von Zugtrassen in Echtzeit. Ein Kunde bestellt also seine Trasse nicht wie zurzeit mitunter mehrere Wochen im voraus, sondern er kann sich kurzfristig entscheiden, einen Zug fahren zu lassen. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von Fahrplan- und Infrastrukturdaten. Wird nun eine Fahrt angemeldet, kann mithilfe von Daten zur aktuellen Betriebssituation ein Fahrplan dynamisch und zeitnah erstellt werden, welcher dann dem Kunden angeboten wird.

Fahrerassistenzsystem Die aktuellen Fahrinformationen (Zustand der Signale, maximal erlaubte Geschwindigkeit) werden dem Triebfahrzeugführer direkt per Führerstandsanzeige übermittelt. Gleichzeitig soll eine berechnete sinnvolle Geschwindigkeit ein komfortables und energiesparendes Fahren ermöglichen. Muss z. B. im nächsten Bahnhof ein Gegenzug abgewartet werden, braucht der Zug nicht mit Höchstgeschwindigkeit zu fahren, sondern kann seine Geschwindigkeit so einrichten, dass die Wartezeit auf den Gegenzug möglichst gering wird.

Technische Dienste Im Bereich der Fahrzeugtechnik sind ebenfalls Automatisierungen denkbar. Zum Beispiel sollte eine Spurkranzschmierung nur dort schmieren, wo es erforderlich ist, z. B. im Kurvenbereich. Dies ließe sich bei kontinuierlicher Standortverfolgung im Fahrzeug mit einer Streckenkarte, in der die zu schmierenden Stellen gekennzeichnet sind, erreichen. Auch das vorausschauende Ein- und Ausschalten der Neigung bei Neigetechnikzügen ist nur mithilfe einer genauen Positionsbestimmung möglich.

1.3.2 Aufgaben mit Sicherheitsverantwortung

In diesen Abschnitt gehören alle Ortungsaufgaben, die Anforderungen an eine sichere und zuverlässige Ortung erfüllen müssen. Diese Systeme liefern essentielle Informationen für moderne Zugsicherungssysteme und neue Betriebsverfahren und tragen damit entscheidend zur Betriebssicherheit bei.

ETCS/ERTMS ab Level 2 Beim neuen europäisch standardisierten Zugsicherungssystem ETCS wird bereits ab Level 2 die Integration unterschiedlicher Ortungsprinzipien erforderlich, so dass eine autarke Ortung der Fahrzeuge mit hoher Genauigkeit, Verlässlichkeit und Sicherheit erfolgen kann. Es werden Fahrzeug und Infrastruktur effizienter genutzt, d. h. die Kapazität der Fahrwege und -netze erhöht sich bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass sich die bordautonome Sensorik auf eine reine Odometrie beschränkt. So wird z. B. für die Zuordnung zu einem bestimmten Gleis gemäß der ETCS-Spezifikation auch weiterhin auf technische Einrichtungen an der Strecke und damit auf eine streckenbasierte Ortung zurückgegriffen.

Virtuelle Zugverbände Im Rahmen verschiedener Zukunftsprojekte – stellvertretend sei hier das Projekt *Bahn 2050* [7] genannt – soll das System Eisenbahn hin zu einem kooperativen System verschiedener kleinerer Einheiten entwickelt werden, welches ohne eine strikt zentral organisierte Struktur auskommt. Insbesondere im Schienengüterverkehr sind entsprechende Entwicklungspotentiale vorhanden, da zurzeit die Züge umständlich an größeren Rangierbahnhöfen neu zusammengestellt werden müssen, wenn die einzelnen Wagen unterschiedliche Fahrtziele haben.

Das Fahren in einem virtuellen Zugverband ist davon gekennzeichnet, dass sich mehrere autonome Fahrzeuge an ein Leitfahrzeug virtuell anhängen, also ihre Geschwindigkeit und den Abstand zum führenden Fahrzeug entsprechend einstellen. Es wird dann, wie in Abb. 1.1 skizziert, im relati-

ven Bremswegabstand⁵ gefahren. Hierfür ist eine sichere und präzise Ortung der einzelnen Fahrzeuge unerlässlich. Für die Manöver beim Trennen und Vereinigen der virtuellen Zugverbände sowie zur Abstandsregelung während der Fahrt sind zusätzlich Nahbereichssensoren und eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erforderlich.

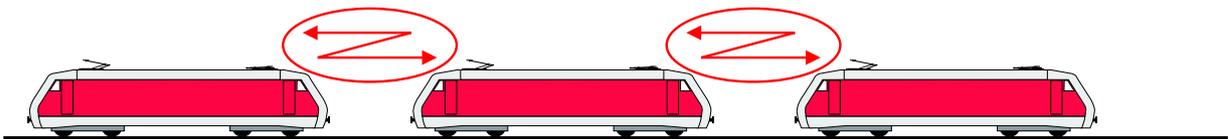


Abbildung 1.1: Virtuelle Zugverbände und das Fahren im relativen Bremswegabstand benötigen eine sichere und präzise Ortung.

Automatisches Fahren Der nächste Schritt in der zukünftigen Entwicklung des Schienenverkehrs ist ein vollautomatischer Fahrbetrieb. Auch für diesen Anwendungsfall ist die sichere Zugortung eine wesentliche Voraussetzung [50]. Hier bietet die Verwendung bordautonomer Ortungstechnologien erhebliche Einsparpotentiale.

Wichtige Anforderungen an sicherheitsrelevante Ortungssysteme für den Schienenverkehr, auch im Hinblick auf stets erforderliche Zulassungsverfahren, sind z. B. in [41] aufgeführt.

1.4 Ziele und Struktur dieser Arbeit

Um Schienenfahrzeuge gleiselektiv sicher orten zu können, reichen handelsübliche satellitenbasierte Systeme trotz ihrer stellenweise recht hohen Genauigkeit nicht aus. In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges System zur bordautonomen Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren vorgestellt, welches die Anforderungen der einleitend skizzierten Anwendungen erfüllt. Zunächst wird in Kapitel 2 das Prinzip der Wirbelstrom-Sensorik zur Geschwindigkeitsmessung erläutert. Kern des Messkonzepts ist eine diversitäre Geschwindigkeitsmessung mit zwei unterschiedlichen Verfahren, der Laufzeit-Korrelation und der Frequenzanalyse. Die einzelnen Messwerte werden in einem Kalman-Filter so fusioniert, dass die Geschwindigkeitsmessung zuverlässig und präzise möglich

⁵Beim Fahren im relativen Bremswegabstand ist der ideale Abstand zwischen zwei sich folgenden Fahrzeugen gleich der Differenz aus dem Bremsweg des zweiten Fahrzeugs und dem Bremsweg des ersten Fahrzeugs. Sind beide Bremswege gleich lang, kann der Abstand theoretisch auf null reduziert werden. Dieses Betriebsverfahren wird bei der Eisenbahn zurzeit nicht angewendet [49].

ist. So können z. B. Ausfälle eines Sensorkanals kompensiert werden. Des Weiteren haben die Sensorsignale die Eigenschaft, dass sie aufgrund ihrer Charakteristik bestimmten Bauteilen des Gleises zugeordnet werden können. Wie man sich dies zunutze machen kann, um z. B. Eisenbahnweichen und ihre Stellung zu erkennen, ist in Kapitel 3 beschrieben. Hier wird detailliert auf die Detektion und Klassifikation von Weichen und Weichenbauteilen anhand ihrer Sensorsignale eingegangen, wobei die jeweiligen Konzepte anhand von Messungen auf einer Eisenbahnstrecke analysiert und verifiziert werden. Zur Bewertung der Klassifikationsergebnisse werden in Kapitel 4 die statistischen Eigenschaften und die Modellierung der Streckeninfrastruktur mit einer digitalen Streckenkarte näher betrachtet. Mithilfe einer solchen Karte kann eine Positionsinformation zu einer Ortung weiterverarbeitet werden. Da ein Ortungssystem auch Sicherheitsverantwortung tragen können soll, wird in Kapitel 5 auf einige ausgewählte grundlegende Aspekte der Sicherheit und Verfügbarkeit des vorgestellten Sensorsystems eingegangen. An dieser Stelle wird die herausragende Eigenschaft der speziellen Wirbelstrom-Sensorik gezeigt, eine Ortung auch noch bei einem teilweisen Ausfall zu ermöglichen.

2 Geschwindigkeits- und Wegmessung

Die Geschwindigkeits- und Wegmessung ist eine der zentralen Messaufgaben im Eisenbahnwesen und wird bereits praktisch seit den Anfängen des Eisenbahnverkehrs angewendet. Neben der Überwachung der Fahrzeuggeschwindigkeit vor Gefahrenpunkten¹ ist die Geschwindigkeitsmessung auch als Teil einer Ortung von Schienenfahrzeugen eine seit jeher wichtige Anwendung. Nach einem Überblick über die zurzeit übliche und mögliche Sensorik wird das System des Wirbelstrom-Sensors näher beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die Möglichkeit eingegangen, die Geschwindigkeit mit unterschiedlichen, z.T. diversitären Verfahren zu messen. Zur Geschwindigkeitsmessung werden die Messkonzepte der Laufzeit-Korrelation und der Frequenzanalyse erläutert. Abschließend wird auf die Fusion der Messwerte mithilfe eines Kalman-Filters eingegangen. Das Ergebnis ist eine mit dem Wirbelstrom-Sensor erzielbare präzise und hochverfügbare Geschwindigkeits- und Wegmessung.

2.1 Sensorik

Im folgenden kurzen Überblick über die zur Geschwindigkeits- und Wegmessung von Eisenbahnen mögliche Sensorik wird sowohl auf heutzutage übliche als auch auf neuartige Konzepte eingegangen.

2.1.1 Radumdrehungszähler

Neben der Geschwindigkeits- und Weginformation für den Triebfahrzeugführer wird ein Radumdrehungszähler auch als Odometer zur Wegmessung im Rahmen der bordautonomen Ortung mit Sicherheitsverantwortung eingesetzt. So erfolgt z. B. bei der *Linienzugbeeinflussung* (LZB) die Wegmessung zwischen zwei

¹Gefahrenpunkte können z. B. Weichen oder durch Fahrzeuge besetzte Gleisabschnitte sein, die für den Zug eine Gefahr darstellen.

Kreuzungspunkten des Linienleiters² mit einem Radumdrehungszähler, wobei hier nur ein kleiner Messbereich von maximal 100 m abzudecken ist. Auch beim ETCS (siehe auch Abschnitt 5.3) werden Radumdrehungszähler als Wegimpulsgeber zur Wegmessung eingesetzt.

Der Radumdrehungszähler ist ein sehr robustes und einfaches Messsystem und ist praktisch auf jedem Fahrzeug bereits vorhanden. Es werden die Umdrehungen n eines Rades gezählt. Durch Multiplikation mit dem Radumfang erhält man den durch das Fahrzeug zurückgelegten Weg

$$x = n \cdot \pi \cdot d, \quad (2.1)$$

wobei d den mittleren Raddurchmesser bezeichnet. Aus einer Differenzierung des Weges erhält man die Fahrzeuggeschwindigkeit

$$v = \frac{dx}{dt} = \pi \cdot d \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (2.2)$$

Allerdings ist die Messgenauigkeit nicht besonders hoch, da immer ein gewisser Schlupf zwischen Rad und Schiene vorhanden ist; dieser kann bei einem modernen Antriebssystem mit Traktionskontrolle bis zu 30 % betragen. Des Weiteren ist der Raddurchmesser nicht konstant, da zum einen bei der Eisenbahn in der Regel kegelförmige Räder verwendet werden, zum anderen sich beim Überdrehen³ der Räder auch der Raddurchmesser ändert, welcher dann neu eingemessen werden müsste. Außerdem können die Räder in extremen Betriebssituationen blockieren oder durchdrehen. Alle diese Messunsicherheiten akkumulieren sich durch das inkrementelle Messprinzip, so dass die Messung eines längeren Weges nur mit häufigem Synchronisieren an Referenzpunkten ausreichend genau ist. Eine Absolutortung ist nicht möglich, ebenso ist ohne weitere Informationen die Transformation in Weltkoordinaten nicht möglich.

2.1.2 Berührungslose Geschwindigkeitsmessung

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Unzulänglichkeiten eines Radumdrehungszählers können mit einer berührungslosen Geschwindigkeitsmessung im wesentlichen vermieden werden. Neben der präzisen Geschwindigkeits- und

²Der Linienleiter der LZB dient zum einen als Antenne zur Übermittlung von Daten, zum anderen bestimmt das Fahrzeug seine absolute Position anhand der Kreuzungspunkte, welche alle 100 m eingebaut sind. Zwischen diesen Kreuzungspunkten wird die Position mittels des Odometers gemessen.

³Verschleißerscheinungen der Räder bzw. Radreifen, wie z. B. Flachstellen und andere Unrundheiten, können mittels Überdrehen wieder beseitigt werden. Allerdings verringert sich bei dieser Maßnahme aufgrund des Materialabtrags der Raddurchmesser.

Wegmessung zur Ortung des Fahrzeugs lässt sich ein solches berührungsloses Messsystem z. B. auch zur Traktionskontrolle einsetzen, indem der Schlupf aus der Geschwindigkeitsdifferenz zu einem Radumdrehungszähler gemessen wird. Ein Gleiten oder Schleudern kann anhand dieser Geschwindigkeitsdifferenz detektiert und durch eine Anpassung der Antriebsleistung wirksam vermieden werden. Die möglichen Sensoren beruhen auf verschiedenen Prinzipien:

Doppler-Radar Radarsensoren arbeiten in der Regel nach dem Dopplerverfahren. Hierbei wird ergibt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit aus der Frequenzverschiebung des reflektierten Radarsignals. Das Verfahren ist abhängig vom Reflexionsverhalten des Untergrunds und damit auch von der Art des Untergrunds. Bei spiegelnden Oberflächen, z. B. von Wasser oder Eis, wird der Sensor u. U. kein reflektiertes Signal empfangen. Auch bei extremen Witterungsverhältnissen kann es zu Ausfällen kommen [40].

Optische Sensorik Auch optische Sensoren erlauben eine berührungslose Geschwindigkeitsmessung. Ein gängiges Verfahren ist dabei die Anwendung eines Ortsfilters, wie z. B. bei CORREVIT[®]-Sensoren [65]. Eine andere Möglichkeit ist das Korrelieren von Bildern, wie dies für die Anwendung im Kfz-Bereich z. B. in [36] beschrieben wird. Mit einem solchen Sensor wurden bereits erfolversprechende Testfahrten mit einem Schienenfahrzeug durchgeführt [32]. Die Anbringung des Sensors am Fahrzeug ist in Abb. 2.1 dargestellt.



Abbildung 2.1: Optischer Sensor zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung eines Schienenfahrzeugs über Grund.

Bei extremen Witterungsverhältnissen – insbesondere bei aufwirbelndem Schnee – kann es allerdings bei optischen Sensoren zu Ausfällen und Falschmessungen kommen. Problematisch ist auch die Anfälligkeit gegenüber Verschmutzung.

Wirbelstrom-Sensor Die berührungslose und damit vollkommen schlupffreie Geschwindigkeits- und Wegmessung mit dem Wirbelstrom-Sensor wird in Abschnitt 2.2 ausführlich behandelt. Wirbelstrom-Sensoren werden üblicherweise zur Defekterkennung in metallischen Bauteilen, auch z. B. bei Eisenbahnschienen [48], verwendet. Dabei ist auch der Einsatz in rauen Umgebungen möglich, da sie robust gegenüber Verschmutzungen sind.

2.1.3 Inertialsensorik

Mit einem Beschleunigungssensor kann die translatorische Bewegung eines Fahrzeugs gemessen werden. Für jede zu erfassende Richtung (x, y, z) ist jeweils ein Sensor erforderlich. Einmaliges Integrieren der gemessenen Beschleunigung ergibt die Fahrzeuggeschwindigkeit, zweimaliges Integrieren den zurückgelegten Weg. Prinzipbedingt kommt es zu einer recht großen Drift, insbesondere bei der Wegmessung. Durch die Kombination mit einem z. B. satellitenbasierten Absolutortungssystem kann mit regelmäßigem Rekalibrieren eine zur Ortung brauchbare Genauigkeit erreicht werden. Die verwendeten Beschleunigungssensoren haben systembedingt bei kleinen Beschleunigungen mitunter ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) [58].

Denkbar ist auch die Erkennung von Weichen anhand eines gemessenen Querbeschleunigungsprofils. Da die Querbeschleunigung a_q im Fahrzeug direkt vom Kurvenradius abhängt, lässt die Messung Rückschlüsse auf die vorhandene Infrastruktur zu. Die Krümmung $\kappa(t)$ einer Strecke ergibt sich mithilfe der Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t)$ aus dem Zusammenhang

$$\kappa(t) = \frac{a_q(t)}{v^2(t)}. \quad (2.3)$$

Sofern zusätzlich zur Beschleunigungsmessung auch ein Gyroskop (Kreisel) zur Verfügung steht, kann die Krümmung auch mittels der gemessenen Winkelgeschwindigkeit berechnet werden. Aus dem Vergleich mit einer geometrischen Streckenkarte können so auch Weichen detektiert und die Ergebnisse als zusätzliche Ortsinformation genutzt werden [51]. Zum Erreichen verlässlicher Messwerte der Fahrzeugorientierung müssen die Messungen wegen der hohen Drift allerdings gestützt werden, ggf. auch mit einer Online-Kalibrierung der Sensoren [58].

2.1.4 Global Navigation Satellite System (GNSS)

Die klassische Anwendung der satellitenbasierten Positionsmessung mit GPS liegt im militärischen Bereich sowie bei der Luftfahrt und im Schifffahrtswesen. Durch die Möglichkeit, einen GPS-Empfänger sehr kompakt zu bauen, sind inzwischen viele zivile Anwendungen, auch im Freizeitbereich, hinzugekommen. Es existiert mittlerweile eine Vielzahl handelsüblicher GPS-Empfänger, so dass auch die Preise für ein einzelnes Gerät in den letzten Jahren drastisch gefallen sind. Navigationssysteme, welche in Kraftfahrzeuge eingebaut werden, basieren ebenfalls zumeist auf GPS.

Der wesentliche Vorteil der satellitenbasierten Ortung liegt in der Tatsache, dass stets eine absolute Positionsinformation gewonnen wird. Allerdings ist das System nicht ständig verfügbar. In Bereichen mit dichter Bebauung kann es zu Abschattungen oder Mehrwegempfang kommen; die Satellitensignale können an Gebäuden reflektiert werden, was die Signallaufzeit erhöht und die Laufzeitmessung somit verfälscht. Dies kann die Ortungsgenauigkeit stark beeinträchtigen, ebenso ist in Einschnitten mitunter nur eine ungünstige Satellitenanordnung sichtbar. In Eisenbahntunnels ist überhaupt kein Signalempfang möglich und somit keine Ortung verfügbar.

Des Weiteren kann mit der bei einer zivilen Nutzung erreichbaren Genauigkeit von 5 bis 15 m [2, 35] nicht das genaue Gleis einer zwei- oder mehrgleisigen Strecke bestimmt werden, was jedoch für den Eisenbahnbetrieb eminent wichtig ist. Eine verlässliche Information über die exakte Gleisbelegung ist unbedingt erforderlich, um eine mehrgleisige Strecke in vollem Umfang nutzen betrieblich zu können.

Mittels Korrektursignalen, wie z. B. DGPS, EGNOS oder WAAS⁴, kann die Genauigkeit der GPS-Messung weiter verbessert werden [42]. Die nicht zu garantierende Ausfallsicherheit bleibt aber eine wesentliche Schwäche der satellitenbasierten Ortung.

2.2 Wirbelstrom-Sensorik

Sämtliche in Abschnitt 2.1 vorgestellten Konzepte sind alleine für sich nicht geeignet, eine sicherheitsrelevante bordautonome Ortung zu realisieren. Ein am *Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT) der Universität Karlsruhe (TH)* ent-

⁴Die Korrektursignale dienen zur Verbesserung der Genauigkeit durch Bezug auf Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten. Mit einer terrestrischen Übermittlung arbeitet das sogenannte *Differential GPS* (DGPS). Die Systeme WAAS (*Wide Area Augmentation System*) und EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) sind hingegen rein satellitengestützte DGPS-Systeme.

wickelter Wirbelstrom-Sensor besitzt hingegen das Potential, als Kern eines Zugsicherungssystems eingesetzt zu werden. Wesentliche Vorteile dieses Sensorsystems sind die gleichzeitige Messung der Geschwindigkeit mit unterschiedlichen Messprinzipien und die Möglichkeit einer absoluten Ortung durch Weichenerkennung (siehe auch Kapitel 3 und 4).

Die folgenden Abschnitte geben eine Übersicht über Funktionsweise und Messmöglichkeiten des Wirbelstrom-Sensors. Hierzu werden nacheinander die Außen- und die Inneneinheit des für die Versuchsfahrten verwendeten Laboraufbaus der Wirbelstrom-Sensorik beschrieben.

2.2.1 Außeneinheit

Neben dem Einsatz in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung können Wirbelstrom-Sensoren allgemein Inhomogenitäten in den magnetischen Eigenschaften eines Bauteils erkennen. Im Bereich der Schiene kann es sich dabei um Schienenbefestigungen⁵, Schienenstöße⁶ und Weichenbauteile⁷, aber auch um mögliche Beschädigungen des Schienenkopfes handeln [48]; je nach Abstand zwischen Sensor und Schienenoberkante kann auch die Oberflächenbeschaffenheit selbst untersucht werden. Eine Prinzipskizze eines Differenz-Wirbelstrom-Sensors ist in Abb. 2.2 dargestellt.

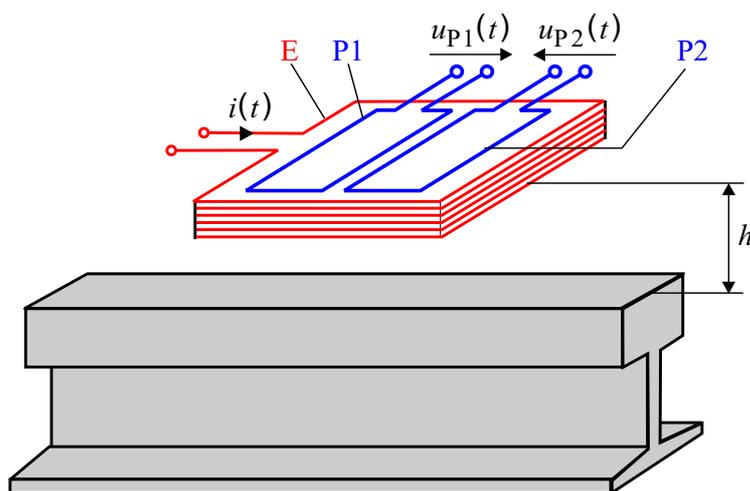


Abbildung 2.2: Prinzipskizze eines Differenz-Wirbelstrom-Sensors; Quelle: [17].

⁵Mithilfe von Schienenbefestigungen werden die Schienen auf den Schwellen in Längs- und vor allem in Querrichtung fixiert.

⁶Schienenstöße sind die zumeist verschweißten Enden benachbarter Einzelschienen, auch zwischen Weichenbauteilen.

⁷Eine detaillierte Beschreibung der wichtigsten Weichenbauteile findet sich in Abschnitt 3.1.

Der Sensor besteht aus einer Erregerspule E und zwei Empfängerspulen P1 und P2. Das von der Erregerspule erzeugte Magnetfeld bewirkt die Entstehung von Wirbelströmen in metallischen Bauteilen in der Nähe des Sensors. Diese erzeugen ihrerseits ein Magnetfeld, welches sich mit dem Erregerfeld überlagert. Metallische Inhomogenitäten stören die Ausbreitung der Wirbelströme, wodurch das überlagerte Magnetfeld verzerrt wird. Da die beiden Empfängerspulen in Differenz zueinander geschaltet sind, ist die resultierende Spannung $u(t)$ gerade null, solange das Magnetfeld in Laufrichtung homogen ist.

Bei einem durch die oben erwähnten Inhomogenitäten im Gleisbereich verzerrten Magnetfeld wird ein Signal erzeugt, das anschließend weiterverarbeitet werden kann. Aus Sicherheitsgründen – so ist z. B. bei der Befestigung des Sensors der Federweg des Drehgestellrahmens zu berücksichtigen – muss ein Abstand des Sensors von der Schienenoberkante von mindestens 100 mm eingehalten werden, sofern der Sensor den vom Rad durchstrichenen Raum verlässt. Letzteres ist aus konstruktiven Gründen erforderlich, da der Sensor die seitlich angebrachten Schienenbefestigungen detektieren soll. Daher werden nur grobe Inhomogenitäten, wie z. B. Schienenbefestigungen, Weichenbauteile usw. erkannt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Schiene selbst hat – aufgrund des relativ großen Abstands zum Sensor – auf die Messung keinen Einfluss [17]. Größere Abstände führen zu einer Verminderung des SNR und auch der maximalen Ortsauflösung der Wirbelstrom-Sensoren. Das Ergebnis einer Simulation für ein Sensorsignal beim Überfahren einer Schienenbefestigung ist in Abb. 2.3 skizziert.

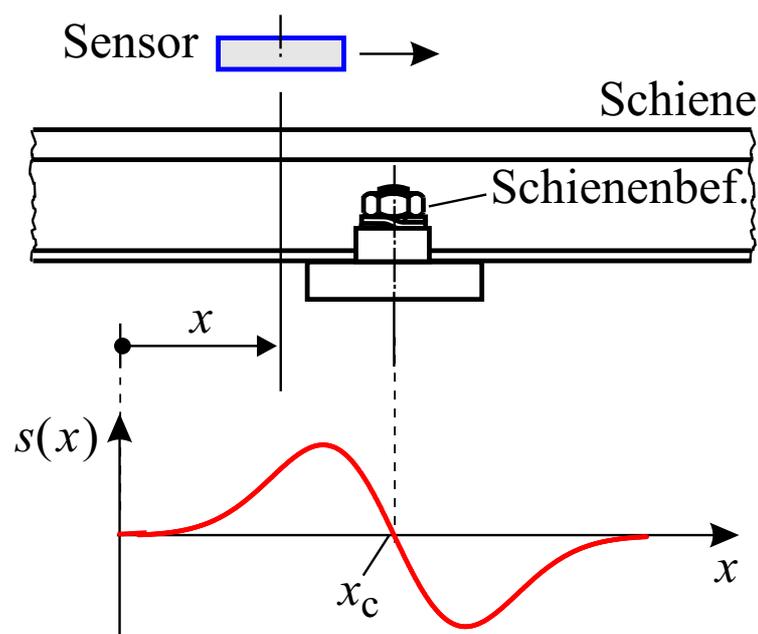


Abbildung 2.3: Signal eines Differenz-Wirbelstrom-Sensors über einer Schienenbefestigung (Simulation); Quelle: [17].

Mit dem neu entwickelten Sensor wurden bereits mehrere Feldtests bei der *Deutschen Bahn AG* (DB AG) [15, 16], der *Albtal-Verkehrsgesellschaft* (AVG) [24] und den *Schweizerischen Bundesbahnen* (SBB) [25] durchgeführt. Hierfür wurde jeweils ein Laboraufbau mit zwei integrierten Wirbelstrom-Sensoren verwendet. Die Odometerfunktion ist bereits in einem von BT RCS entwickelten Industrie-Prototypen realisiert, welcher zurzeit im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts *DemoOrt* [47] aufgebaut und eingehend erprobt wird.

Beide Sensoren sind zur Abschirmung gegenüber Störungen – hierzu zählen sowohl elektrische Felder aber auch insbesondere sich bewegende metallische Bauteile in der Nähe des Sensors – jeweils mit einem Schirmgehäuse versehen [23]. Die Sensoren mitsamt der Schirmgehäuse sind zum Schutz gegen Beschädigungen in ein Metallgehäuse mit einer Bodenplatte aus Kunststoff eingebaut, wobei immer zwei Sensoren paarweise verwendet werden. Die Anbringung des Gehäuses am Drehgestell eines Triebwagens – hier an dem für die Messungen verwendeten Triebwagen der AVG – ist in Abb. 2.4 zu sehen. Die Halterung des Sensorgehäuses ist dabei starr mit dem Drehgestellrahmen verbunden. Mittels der verwendeten Sensorhalterung kann zu Testzwecken die seitliche Ausrichtung des Sensors über der Schiene variiert werden.



Abbildung 2.4: An einem Triebwagen der AVG angebrachter Laboraufbau mit zwei Wirbelstrom-Sensoren in einem Gehäuse.

Eine günstige Stelle zum Befestigen der Sensorik ist generell der Bereich zwischen den Achsen eines Drehgestells, da dann die Auslenkung des Sensors gegenüber der Schiene auch in Kurvenfahrten gering bleibt und die Signale eine gleichbleibend gute Qualität haben [17]. Allerdings sind genau an dieser Stelle oftmals Schienenbremsen⁸ angebracht, so dass der Sensor dann nur auf der Außenseite des Drehgestellrahmens befestigt werden kann. Mit dieser Anordnung konnte bei den Versuchsfahrten auf der *Albtalbahn* auch in engen Kurven eine zur korrelativen Geschwindigkeitsmessung ausreichende Signalqualität realisiert werden [24].

Optische Sensoren besitzen den Nachteil einer vergleichsweise hohen Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung. Auch aufwirbelnder Schnee macht eine Verwendung optischer Sensoren im Bahnbereich schwierig, da diese dann keine verlässlichen Daten mehr liefern können. Der Wirbelstrom-Sensor hingegen ist unabhängig von äußeren Einflüssen, wie Staub, Wasser oder Eis. Die Schienenbefestigungen sind auch bei einer wie in Abb. 2.5 dargestellten geschlossenen Schneedecke problemlos zu detektieren.



Abbildung 2.5: Der Wirbelstrom-Sensor ist gegenüber Witterungseinflüssen unempfindlich.

⁸Schienenbremsen wirken als zusätzliche Bremsen unabhängig von der Reibung zwischen Rad und Schiene und werden zur besonders schnellen Verzögerung der Zuges benötigt. Bei dem für die Messfahrten verwendeten Triebwagen sind sämtliche Drehgestelle mit Schienenbremsen ausgestattet, weshalb die Anbringung auf der Außenseite eines Laufdrehgestells erfolgte.

Messfahrten auf der *Albtalbahn* wurden bei unterschiedlichen Jahreszeiten und Witterungen durchgeführt. Hierbei konnte in keinem Fall eine signifikante Abhängigkeit der Sensorsignale von den jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen festgestellt werden. Abbildung 2.6 zeigt Sensorsignale, die auf dem in Abb. 2.5 dargestellten Bahnhofsgleis der *Albtalbahn* bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen aufgenommen wurden.

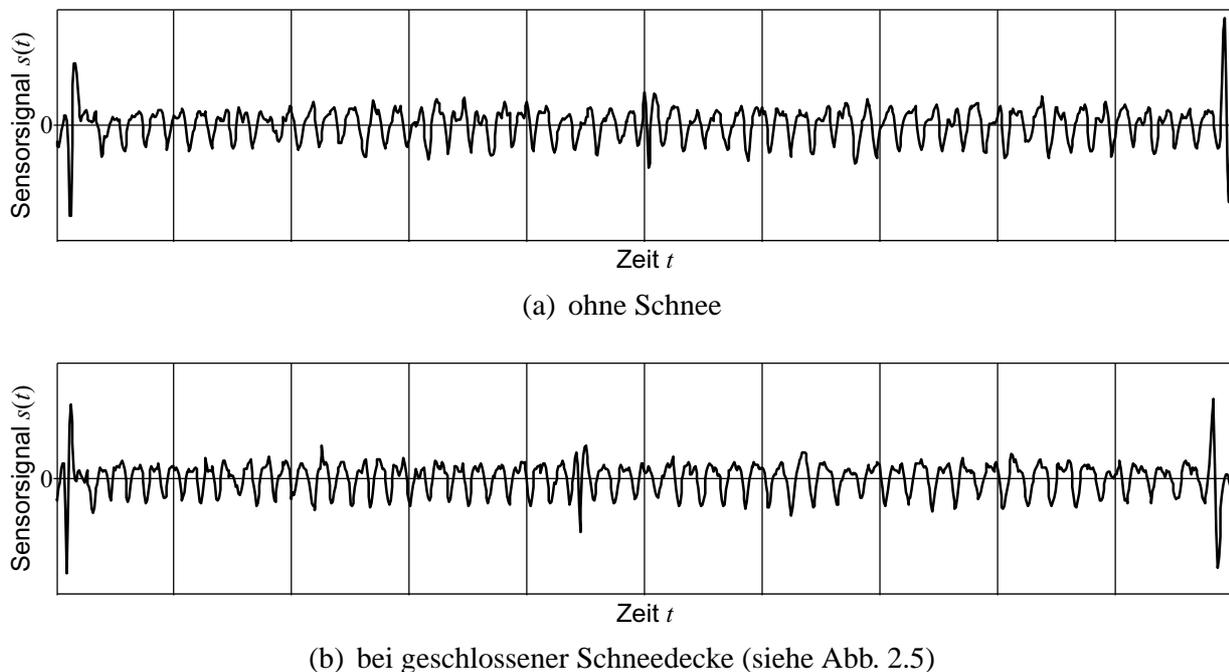


Abbildung 2.6: Gemessene Wirbelstrom-Sensorsignale auf einem Bahnhofsgleis.

Zwischen den Signalen ohne Schnee (a) und denen bei geschlossener Schneedecke aufgenommenen (b) besteht – abgesehen vom aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten anderen Zeitmaßstab – kein wesentlicher Unterschied. Eine Dämpfung der Signalamplitude oder eine Veränderung der Signalcharakteristik ist nicht festzustellen.

2.2.2 Inneneinheit

Die Inneneinheit des Wirbelstrom-Sensors hat zum einen die Aufgabe, die Erregerspulen mit Strom zu versorgen, zum anderen müssen die Messsignale demoduliert, verstärkt und gefiltert werden. Für diese Aufgaben wurde bei allen Versuchsfahrten (siehe z. B. [24, 25]) ein Wirbelstrom-Prüfgerät ECM⁹ Defectomat [21] der Firma Dr. Förster, Reutlingen, verwendet. In dieses Gerät, welches in Abb. 2.7

⁹ECM=Eddy Current Module

links zu sehen ist, sind alle zum Betrieb notwendigen Komponenten integriert. Es sind zwei Wirbelstrom-Kanäle mit Erregerfrequenzen von 20 bzw. 30 kHz¹⁰ verwendet. Zur Verbesserung des SNR ist außerdem jeweils ein Leistungsverstärker ECM/LV¹¹ vorgeschaltet, da der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt bei dieser Anwendung wesentlich größer ist als z. B. bei Materialprüfungen, für die dieses Gerät üblicherweise benutzt wird. Das Sensorsignal wird außerdem noch bandpassgefiltert, um sowohl hochfrequente Störsignale als auch den Gleichanteil des Signals zu unterdrücken. Dieses Bandpassfilter ist als eine Kombination aus Hochpass- und Tiefpassfilter realisiert. Der ECM Defectomat verfügt zudem über einen analogen Ausgang, an dem das Sensorsignal zur weiteren Verarbeitung abgegriffen werden kann.

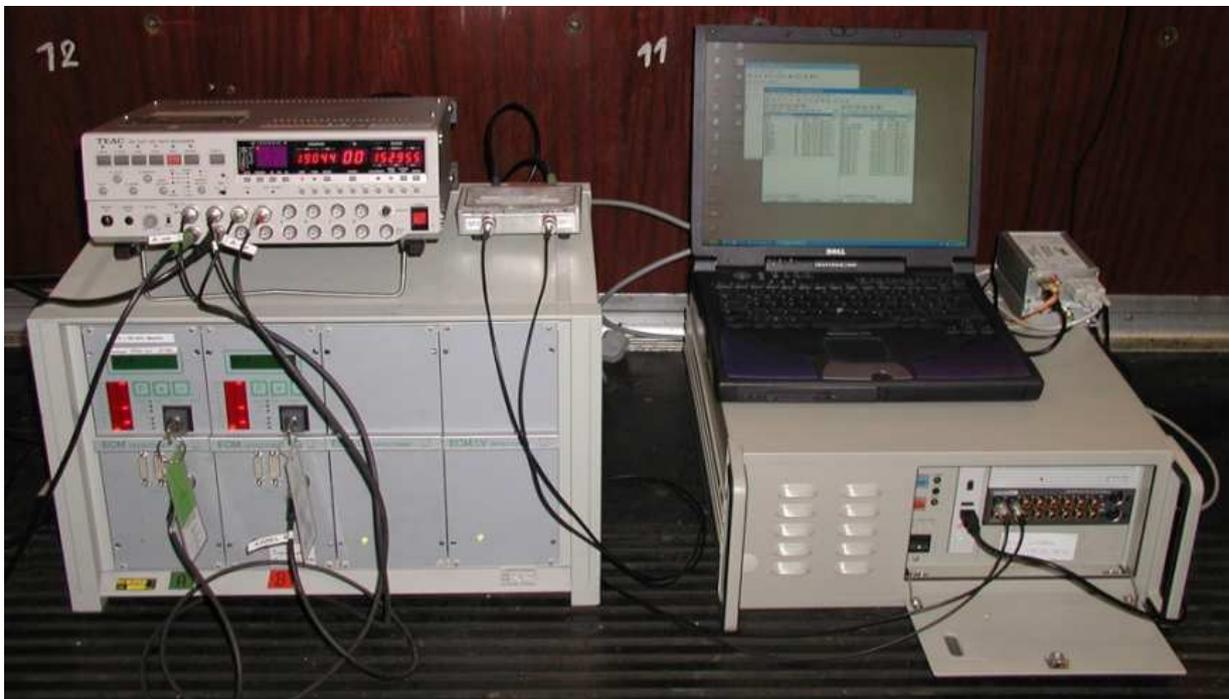


Abbildung 2.7: Inneneinheit des Laboraufbaus: Wirbelstrom-Prüfgerät, DAT-Recorder und PC.

Ein wichtiger Baustein im ECM Defectomat ist die phasenselektive Demodulation, welche das empfangene Signal in die I-Komponente (in Phase mit dem Erregersignal) und die Q-Komponente (Quadraturkomponente; 90° phasenverschoben zum Erregersignal) aufspaltet. Durch eine Phasenselektion [17] können Störungen, z. B. hervorgerufen sowohl durch Vibrationen des Gehäuses oder der Sensorabschirmung [23] als auch durch ein Verkippen des Sensors gegenüber der

¹⁰Diese Frequenzen werden im Bahnbereich üblicherweise nicht für andere Zwecke verwendet, so dass sichergestellt ist, dass keine ungewollte Beeinflussung anderer Komponenten erfolgt.

¹¹ECM/LV=Eddy Current Module / Leistungsverstärker

Schiene, wirksam unterdrückt werden, da diese Störsignale ein feste Phasenlage zum Erregersignal haben. Werden, wie dies beim ECM Defectomat der Fall ist, I- und Q-Komponente des Sensorsignals getrennt bzw. als Ortskurve ausgegeben, so ist die Messung der jeweiligen Phasenwinkel von Nutz- und Störanteil recht einfach möglich: Man erzeugt im Sensorsignal gezielt Störsignale – z.B. durch Einbringen von Vibrationen am Gehäuse – und stellt den Phasenwinkel der Auswerteeinheit so ein, dass die Störungen nur noch in der Q-Komponente erscheinen. Die nachfolgende Auswertung kann dann auf den I-Anteil des Messsignals beschränkt werden, der zum Störanteil um 90° phasenverschoben ist, da dann die Störsignale nicht mehr im Sensorsignal sichtbar sind [17]. Mit dieser Einstellung konnten in allen Versuchen die besten Signal-Rausch-Verhältnisse erzielt werden.

Als z. T. problematisch hat sich das Hochpassfilterverhalten der Sensorik herausgestellt. Dieses Hochpassfilter mit einer Flankensteilheit von 80 dB pro Dekade [21] sorgt für mittelwertfreie Sensorsignale, unterdrückt allerdings bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten auch die Sensornutzsignale. Zwar kann beim ECM Defectomat die Eckfrequenz des Hochpassfilters auf 1 Hz eingestellt werden, so dass auch Geschwindigkeiten von unter 0,6 m/s gemessen werden können; jedoch bewirkt eine solch niedrige Eckfrequenz ein entsprechend langes Einschwingverhalten des Sensors. Dies kann sich wiederum negativ bei der Weichenerkennung auswirken [24]. Insofern wurde eine Einstellung der Eckfrequenz auf 3,3 Hz gewählt, um sowohl die Messung niedriger Geschwindigkeiten von bis zu 1,2 m/s realisieren zu können, als auch ein zur Weichenerkennung brauchbares Signal zu erhalten. Um auch extrem niedrige Fahrzeuggeschwindigkeiten messen zu können, ist für diese Fälle ein gleichspannungsgekoppeltes Signal zu bevorzugen, welches allerdings beim ECM Defectomat nicht zur Verfügung steht.

Da das Spektrum des Nutzsignals in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit bekannt ist, wird in der von BT RCS entwickelten Auswerteeinheit die Filterung auf der digitalen Seite mit einem adaptiven Bandpassfilter durchgeführt. Hierbei werden die Eckfrequenzen der Filter an die jeweilige Geschwindigkeit und damit an die Frequenz des Nutzsignals angepasst, um sowohl eine optimale Unterdrückung der Störsignale zu erreichen, als auch das Nutzsignal möglichst nicht zu beschneiden.

Die demodulierten, analogen Wirbelstrom-Sensorsignale beider Kanäle werden mit einem DAT-Recorder auf Magnetbänder aufgezeichnet sowie über eine A/D-Karte digitalisiert und mit einem handelsüblichen PC gespeichert. Die abgespeicherten Signale können im Labor offline ausgewertet werden. Das Bandgerät kann außerdem für eine simulierte Online-Signalverarbeitung benutzt werden, indem die Signale vom Band abgespielt und dann von einem PC verarbeitet werden.

2.2.3 Störeinflüsse

Die Wirbelstrom-Sensorik hat insbesondere gegenüber optischen Systemen den entscheidenden Vorteil, dass sie robuster gegenüber äußeren Einflüssen, wie Staub, Wasser und Eis ist. Eine Messung ist somit auch unter extremen Verschmutzungsbedingungen möglich, wie sie im Bahnbetrieb tagtäglich auftreten. Damit besitzt der Sensor eine für Bahnanwendungen geeignete Verfügbarkeit, ohne besondere Anforderungen an Wartung bzw. Pflege zu stellen.

Störungen, welche in beiden Spulen eines Sensors gleichsinnig auftreten, werden bei gut abgeglichenen Sensoren aufgrund des Differenzprinzips nahezu vollständig unterdrückt. Hierunter fallen z. B. Bewegungen des Sensors, welche mit einer Höhenänderung gegenüber der Schiene einhergehen. Des weiteren werden Störungen, welche in einer festen Phasenlage zum Erregersignal auftreten, durch die phasenselektive Demodulation beseitigt, wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erwähnt. Starke äußere elektrische oder magnetische Felder könnten die Messung allerdings stören, da sie mitunter gegensinnig auf beide Differenzspulen wirken. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 2.8 gezeigt.

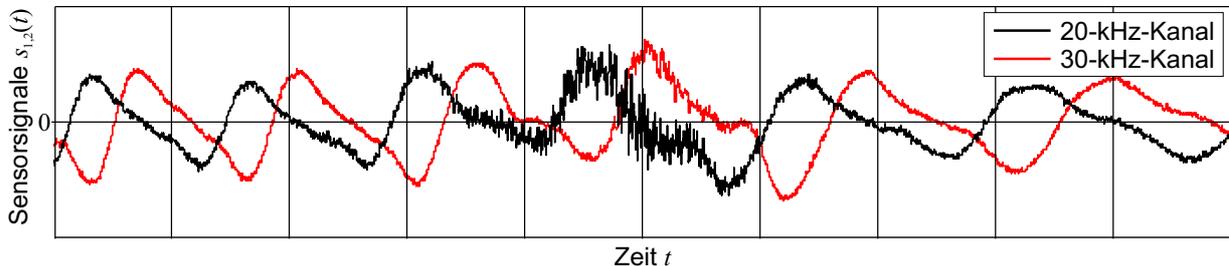


Abbildung 2.8: Kurzzeitige Störung des Sensorsignals, hier vorwiegend im 20-kHz-Sensorkanal.

Solche von außen aufgeprägten Störungen machen sich zumeist nur in einem Sensorkanal bemerkbar, da die beiden Sensorkanäle mit unterschiedlichen Erregerfrequenzen betrieben werden. Daneben kann es aufgrund von starken Fahrzeugbewegungen zu einem Verdrehen der Sensoren gegenüber der Schiene kommen, was zu einer Dekorrelation der Sensorsignale führen kann.

In den folgenden Abschnitten wird die Auswertung der Signale mit dem Ziel der Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit erläutert. Dabei werden zum einen die zwei Verfahren Laufzeit-Korrelation und Frequenzanalyse beschrieben. Zum anderen wird auf die Fusion der mit den unterschiedlichen Verfahren gewonnenen Geschwindigkeitswerte mit einem Kalman-Filter eingegangen.

2.3 Laufzeit-Korrelation

Die Anwendung der Laufzeit-Korrelation ist eine bereits eingehend untersuchte und bewährte Methode zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung, z. B. von bewegten Oberflächen [3, 22, 43, 64] und von Schienenfahrzeugen [17]. Daher werden in den folgenden Unterabschnitten nur die wichtigsten Aspekte zusammengefasst, soweit sie für die Ortung relevant sind.

2.3.1 Funktionsprinzip

Bei der korrelativen Geschwindigkeitsmessung werden zwei Sensoren in Laufrichtung in einem Abstand l zueinander angebracht, welche jeweils charakteristische Signale an der Strecke aufnehmen. Wichtig sind vor allem eine örtliche Stationarität der Signale und eine gewisse Robustheit der Sensorik gegenüber den z. T. rauen Umgebungsbedingungen, so dass beide Sensoren jeweils die gleichen, lediglich um eine Laufzeit T zueinander verschobenen Signale aufnehmen. Die Anwendung der korrelativen Geschwindigkeitsmessung ist in Abb. 2.9 schematisch dargestellt.

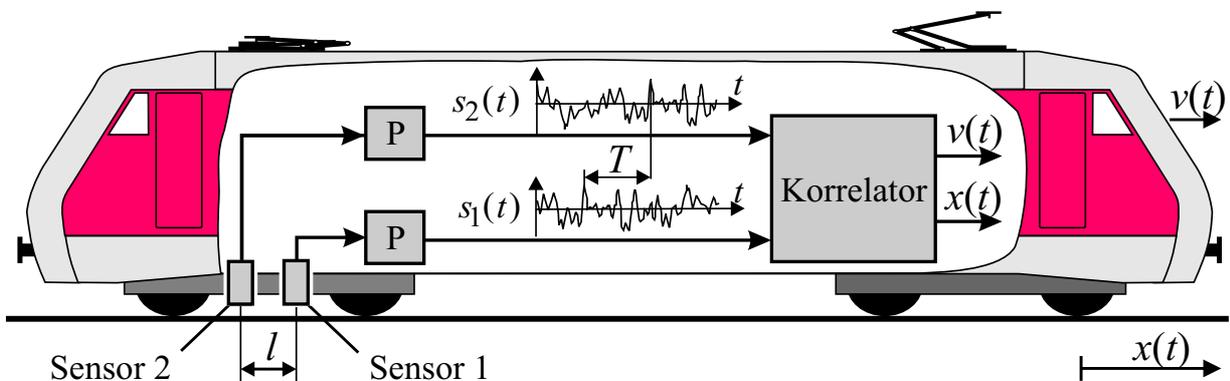


Abbildung 2.9: Korrelative Geschwindigkeitsmessung an Bord einer Lokomotive; P bezeichnet die die Signal-Vorverarbeitung; Quelle: [17].

Zur Geschwindigkeitsmessung eines Schienenfahrzeugs werden die Sensoren sinnvollerweise an dessen Drehgestell angebracht und auf die Schiene ausgerichtet. Als Datenquelle für die Laufzeit-Korrelation können dabei sowohl der im vorigen Abschnitt beschriebene Wirbelstrom-Sensor, als auch z. B. optische Sensoren dienen [3, 64]. Nach einer Signalvorverarbeitung – in Abb. 2.9 mit P bezeichnet – werden die Signale dem Korrelator zugeführt, welcher die Signallaufzeit T und daraus wiederum die momentane Geschwindigkeit v und durch Integrieren der Geschwindigkeitswerte den zurückgelegten Weg x berechnet.

Wie in Abb. 2.10 skizziert, sind die Sensorsignale $s_1(t)$ und $s_2(t)$ im Idealfall identisch, allerdings gegeneinander um eine Laufzeit T verschoben, welche abhängig von der jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeit v ist.

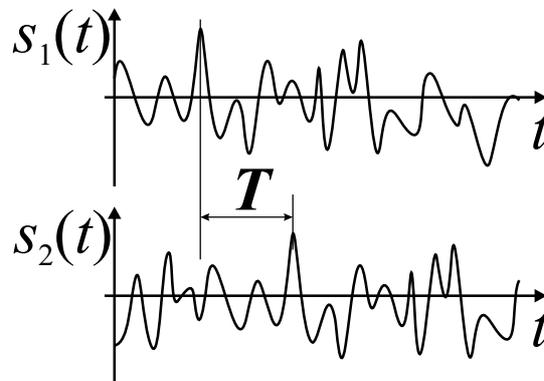


Abbildung 2.10: Sensorsignale $s_1(t)$ und $s_2(t)$ zur korrelativen Geschwindigkeitsmessung.

Diese Laufzeit T entspricht genau der Position des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF)

$$\Phi_{12}(\tau) = \lim_{T_M \rightarrow \infty} \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} s_1(t - \tau) s_2(t) dt \quad (2.4)$$

beider Sensorsignale $s_1(t)$ und $s_2(t)$, die während der Messzeit T_M von den Sensoren ausgegeben werden. Die Position des Maximums der KKF ist gerade um die Laufzeit T vom Nullpunkt verschoben, wie aus Abb. 2.11 hervorgeht.

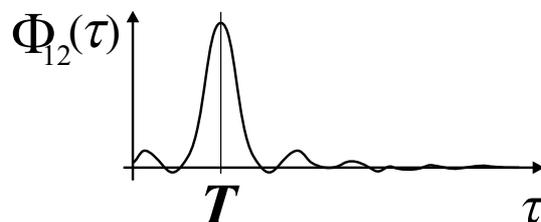


Abbildung 2.11: Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{12}(\tau)$ zweier um die Laufzeit T gegeneinander verschobener Sensorsignale

Anschaulich betrachtet beschreibt die Kreuzkorrelationsfunktion lineare Ähnlichkeiten zweier Signale. Sie ist durch das arithmetische Mittel der beiden Signalleistungen nach oben beschränkt. Diese Schranke wird genau dann erreicht, wenn die beiden Signale bis auf eine Verschiebung und ggf. eine Skalierung identisch sind. Im Falle der Laufzeit-Korrelation sind diese Ähnlichkeiten gerade dann am

größten, wenn man die beiden Sensorsignale genau um ihren Laufzeitunterschied T gegeneinander verschiebt.

Die Laufzeit und damit die Geschwindigkeit kann z. B. mithilfe eines Open-loop-Korrelators (OLC) berechnet werden, welcher das Maximum der KKF sucht und die entsprechende Laufzeit

$$T_{\text{olc}} = \arg \max_{\tau} \{ \Phi_{12}(\tau) \} \quad (2.5)$$

ausgibt. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ergibt sich dann zu

$$v_{\text{olc}} = \frac{l}{T_{\text{olc}}} . \quad (2.6)$$

Den Kreuzkorrelationskoeffizienten $\varrho_{12}(\tau)$ der mittelwertfreien Signale erhält man durch eine Normierung der KKF auf die Standardabweichung $\sigma_{1,2}$ der Signale:

$$\varrho_{12}(\tau) = \frac{\Phi_{12}(\tau)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} . \quad (2.7)$$

Für Werte des Kreuzkorrelationskoeffizienten $\varrho_{12}(\tau)$ von genau eins handelt es sich dabei um Sensorsignale, die bis auf eine Verstärkung identisch sind¹². Bei Messungen mit realen Daten werden die maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten in der Regel kleiner als eins sein, da die Signale von Störungen beeinflusst werden. Ein für die auf einem Eisenbahngleis aufgenommenen Wirbelstrom-Sensorsignale typischer Verlauf des Kreuzkorrelationskoeffizienten $\varrho_{12}(v\tau)$ ist in Abb. 2.12 dargestellt¹³.

Auf freier Strecke detektiert der Sensor vornehmlich die näherungsweise äquidistanten Schienenbefestigungen. Da die Sensorsignale hierdurch einen hohen periodischen Anteil enthalten, besitzt auch deren KKF einen ausgeprägten periodischen Anteil. Der mittlere Abstand \bar{x}_{cl} zwischen zwei benachbarten Schwellen ist gleich dem mittleren Abstand der Maxima der KKF. Die Signallaufzeit T_{olc} ergibt sich aus der Lage des Hauptmaximums der KKF.

¹²Soll der Kreuzkorrelationskoeffizient von nicht mittelwertfreien Signalen berechnet werden, so ergibt sich eine etwas andere Normierung, indem man das Produkt der Erwartungswerte der Signale von der KKF abzieht. Für alle Versuche mit dem Wirbelstrom-Sensor kann von mittelwertfreien Signalen ausgegangen werden, da der Gleichanteil durch das Hochpassfilter entfernt wird.

¹³Hier wurden die Signale auf eine einheitliche Fahrzeuggeschwindigkeit normiert und die Ortssignale anschließend korreliert.

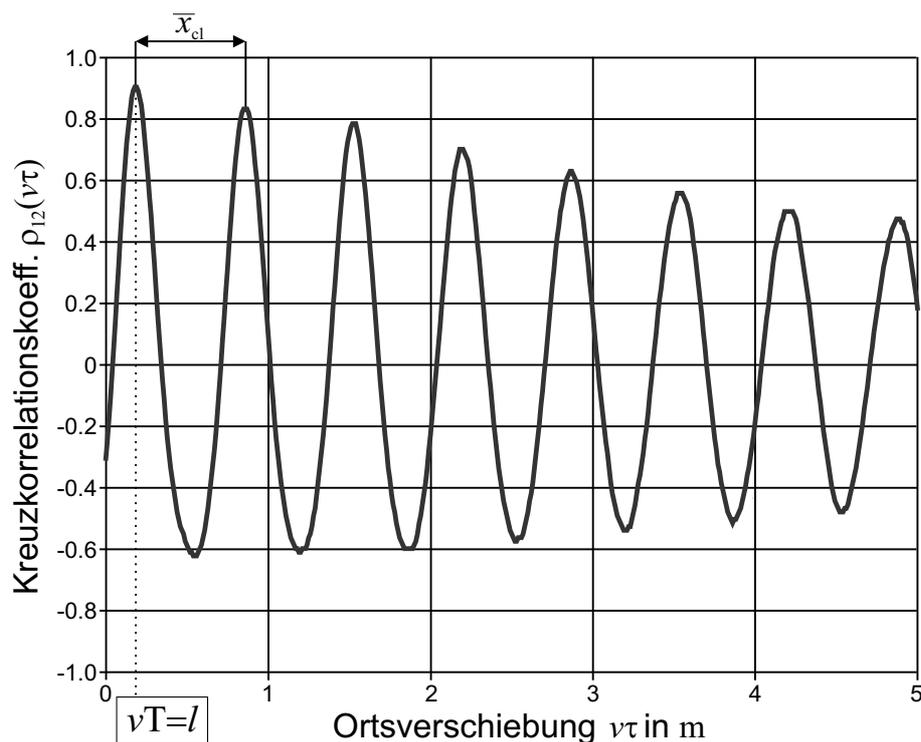


Abbildung 2.12: Auf freier Strecke gemessener Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho_{12}(v\tau)$ der Wirbelstrom-Sensorsignale.

2.3.2 Messbetrieb

Der für den Korrelator-Messbetrieb wichtigste Parameter ist die Messzeit T_M (siehe Gl. (2.4)), welche auch Mittelungszeit genannt wird. Sie bezeichnet die Zeitspanne, in welcher ein Messwert für die Laufzeit gewonnen wird. Wie ebenfalls aus Gl. (2.4) ersichtlich, ergeben sich bei der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion für endliche Messzeiten T_M prinzipbedingte Ungenauigkeiten, da die Signale nicht mehr auf ihrer gesamten Länge korreliert sind.

Für die Laufzeit-Korrelation ist entscheidend, dass mindestens ein Ereignis in beiden zu korrelierenden Sensorsignalen enthalten ist. Somit ergeben sich für geringe Geschwindigkeiten große, für hohe Geschwindigkeiten hingegen kleine Mittelungszeiten. Bei geringen Geschwindigkeiten spielt außerdem die Betriebsart des Korrelators eine Rolle – möglich sind ein Open-loop-Korrelator (OLC) oder ein Closed-loop-Korrelator (CLC)¹⁴. Bei großen Laufzeiten T sind die Signale der beiden Kanäle nicht mehr auf ihrer gesamten Länge korreliert, so dass der Korrelationskoeffizient des OLC bei zu kleinen Messzeiten stark absinkt. Beim CLC

¹⁴Der CLC verschiebt eines der beiden Signale zunächst um eine Modelllaufzeit T_m , welche der Signallaufzeit T entsprechen sollte. Die resultierende KKF hat ihr Maximum dann genau bei null und entspricht damit im Idealfall identischer Signale der Autokorrelationsfunktion.

tritt dieser Effekt hingegen nicht auf, wenn sich dieser im Abgleichpunkt befindet. In Anhang A.2 ist die Bestimmung einer sinnvollen Messzeit für die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen dargestellt.

Nach [17, 64] beträgt bei der Verwendung eines CLC im Abgleichpunkt der relative Fehler der Geschwindigkeitsmessung

$$\frac{\sigma_{\hat{v},\text{clc}}}{v} \approx \frac{1 - \varrho_{12}^2(T)}{\sqrt{f_{x,\text{gr}} \cdot v \cdot T_{\text{clc}}}}, \quad (2.8)$$

mit der Momentangeschwindigkeit v , der Ortsgrenzfrequenz $f_{x,\text{gr}}$ der Signale, welche vom verwendeten Sensor abhängt und bei der hier beschriebenen Anordnung etwa 6 pro m beträgt, der Zeitkonstante des Korrelators T_{clc} und dem maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten

$$\varrho_{12}(T) = \arg \max_{\tau} \{\varrho_{12}(\tau)\} \quad (2.9)$$

bei der entsprechenden Signallaufzeit T .

Hieraus ergibt sich bei einer Zeitkonstante des Korrelators von

$$T_{\text{clc}} \approx T_{\text{M}} = 0,5 \text{ s}$$

eine Abschätzung für die relative Standardabweichung

$$\frac{\sigma_{\hat{v},\text{clc}}}{v} \approx \frac{1 - \varrho_{12}^2(T)}{\sqrt{v \cdot 3 \frac{\text{s}}{\text{m}}}} \quad (2.10)$$

der Fahrzeuggeschwindigkeit v . Weitere Details und Anwendungen der Laufzeit-Korrelation sind in [3, 17, 22, 64] aufgeführt.

Da die Geschwindigkeitsmessung berührungslos erfolgt, ist die Messgenauigkeit nicht von den Reibungsverhältnissen an der Schiene abhängig. Auch ein Schleudern bzw. Gleiten der Antriebsräder hat keinen Einfluss auf die Messung. Die relative Messunsicherheit der Wegmessung liegt bei der Verwendung eines CLC im Bereich von wenigen Promille [17]. Allerdings wird die Weginformation durch ein Integrieren der gemessenen Geschwindigkeitswerte gewonnen, so dass sich Messunsicherheiten akkumulieren können. Daher ist zur Reduzierung der absoluten Messabweichung eine Synchronisierung der Wegmessung anhand einer Absolutposition erforderlich, wenn auch deutlich weniger häufig als z. B. bei einem Radumdrehungszähler.

Des weiteren benötigt die korrelative Geschwindigkeitsmessung auf jeden Fall zwei Sensorkanäle, so dass der Ausfall eines Kanals stets einen Gesamtausfall darstellt. Im folgenden Abschnitt wird ein Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung vorgestellt, welches bereits mit nur einem verfügbaren Sensorkanal funktioniert.

2.4 Frequenzanalyse

Die am häufigsten am Gleis anzutreffenden Bauteile sind die Schienenbefestigungen, welche aufgrund ihres in etwa konstanten Abstands näherungsweise periodische Signale erzeugen. Wie aus Abb. 2.13 deutlich wird, besteht ein wesentlicher Teil des demodulierten Wirbelstrom-Sensorsignals aus diesen periodischen Signalen. Da der mittlere Abstand der Schienenbefestigungen und damit die Mittelfrequenz des resultierenden Sensorsignals bekannt sind, lässt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit so auf eine von der Laufzeit-Korrelation unabhängige Verfahrensweise messen.

Abbildung 2.13 zeigt ein typisches zeitabhängiges Signal des Wirbelstrom-Sensors. Die Schienenbefestigungen heben sich deutlich als nahezu periodischer Anteil im Signal ab. Der Signalanteil mit größerer Amplitude ist auf ein Weichenbauteil (hier ein Herzstück) zurückzuführen und findet sich als aperiodischer Anteil im Signal wieder. Da diese Bauteile näher an den Sensor heranreichen als die normalen Schienenbefestigungen, ist auch die resultierende Signalamplitude entsprechend größer.

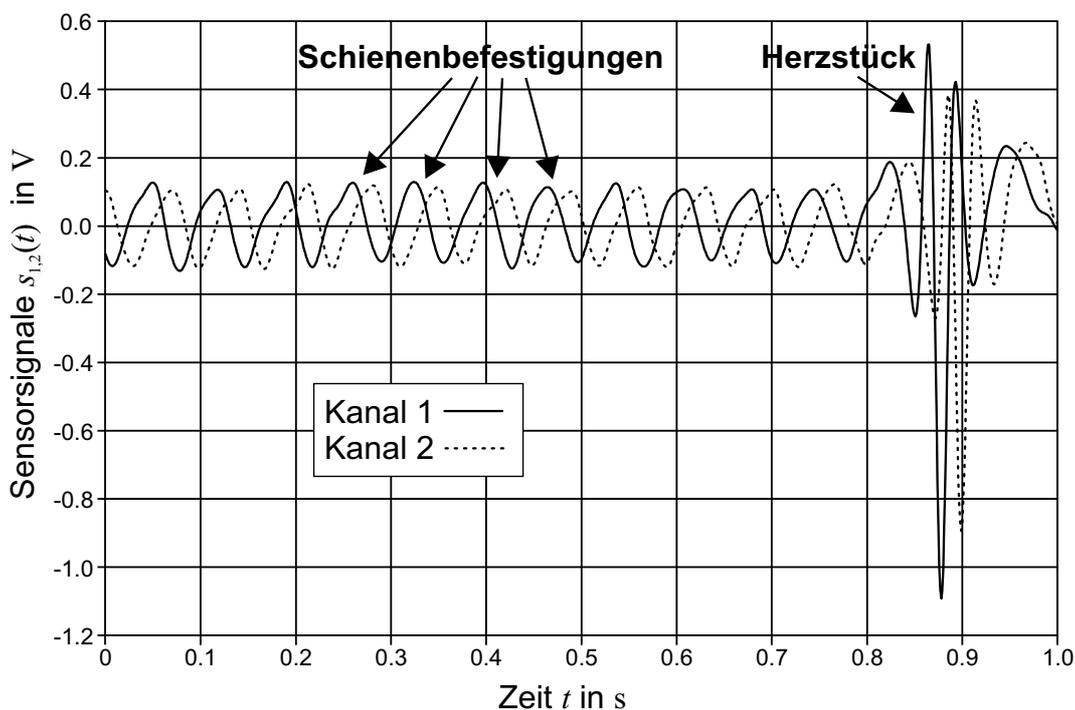


Abbildung 2.13: Gemessenes Wirbelstrom-Sensorsignal $s(t)$.

Ein Vorteil der Frequenzanalyse gegenüber der Laufzeit-Korrelation ist, dass die Signale beider Sensoren auch kanalweise individuell untersucht werden können. Somit ist bei Verwendung zweier Sensoren eine redundante Geschwindigkeits-

messung möglich, worauf in Kapitel 5 noch eingegangen wird. Allerdings müssen für eine sinnvolle Auswertung die Signale bei der Frequenzanalyse periodisch sein, wohingegen die Laufzeit-Korrelation auch mit nichtperiodischen Signalen funktioniert. Darüber hinaus ergibt sich im Falle eines anderen Abstands der Schienenbefestigungen im Gegensatz zur Laufzeit-Korrelation ein systematischer Fehler der berechneten Geschwindigkeit.

2.4.1 Funktionsprinzip

Ein über der Schiene bewegter Wirbelstrom-Sensor detektiert auf freier Strecke die Schienenbefestigungen, welche in einem näherungsweise konstanten Abstand \bar{x}_{cl} verlegt sind. Mit diesem Sensor werden Signale mit einer zur Fahrzeuggeschwindigkeit v proportionalen Grundfrequenz

$$f_0 = \frac{v}{\bar{x}_{cl}}, \quad (2.11)$$

erzeugt.

Dieses Sensorsystem hat damit ähnliche Eigenschaften wie die gängigen Ortsfiltersysteme, nur dass das eigentliche Ortsfilter in der zu messenden Oberfläche enthalten ist und nicht mit dem Sensor mitbewegt wird. Entsprechend erhält man z. B. nach Gl. (2.14) einen Ausdruck für die Fahrzeuggeschwindigkeit mit der im Signal enthaltenen Grundfrequenz f_0 . Diese kann auf unterschiedliche Arten berechnet werden, welche in den folgenden Unterabschnitten skizziert werden.

2.4.1.1 Maximumsuche im Leistungsdichtespektrum

Auf freier Strecke wird in der Regel ein Schwellenabstand \bar{x}_{cl} von etwa 60 cm recht genau eingehalten, insbesondere bei maschinell verlegten Gleisen. Durch eine Maximumsuche im Signalspektrum erhält man die Frequenz f_0 , mit der die Schienenbefestigungen den Wirbelstrom-Sensor passieren. Abbildung 2.14 zeigt ein Beispiel für ein typisches Leistungsdichtespektrum eines Sensorsignals. Das durch die Schienenbefestigungen aufgeprägte Frequenzmaximum f_0 sowie die Oberwellen bei f_1 und f_2 sind als Spitzen im Leistungsdichtespektrum

$$|S|^2(f) = |\mathcal{F}\{s(t)\}|^2 \quad (2.12)$$

des ausgeschnittenen Signals $s(t)$ gut zu erkennen. Die Oberwellen bei den Frequenzen f_1 und f_2 entstehen, da die von den Schienenbefestigungen hervorgerufene Änderung des magnetischen Widerstands im Gleis nicht sinusförmig verläuft.

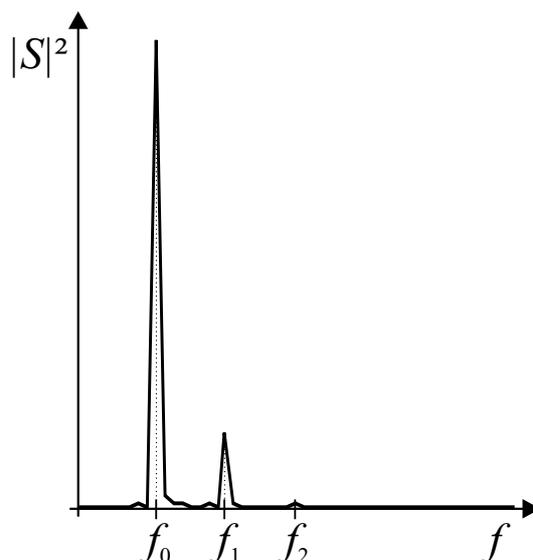


Abbildung 2.14: Leistungsdichtespektrum $|S|^2(f)$; gemessen auf freier Strecke.

Somit kann die Grundfrequenz der Schwellen

$$f_0 = \arg \max_f \{|S|^2(f)\} \quad (2.13)$$

durch eine Maximumsuche im Leistungsdichtespektrum gefunden werden. Mit dem mittleren Schwellenabstand \bar{x}_{cl} ergibt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit zu

$$v_{\text{Freq}} = f_0 \cdot \bar{x}_{cl}. \quad (2.14)$$

Der Wert von \bar{x}_{cl} kann mithilfe einer exakt bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit – beispielsweise mit dem Korrelator – an örtliche Verhältnisse angepasst und in einer digitalen Streckenkarte als Parameter abgespeichert werden. Dies ist insbesondere auf Nebenstrecken interessant, auf denen der Schwellenabstand oft größer ist als das Normmaß von 60 cm. Bei den in den Abschnitten 2.4.2.2 und 2.5.2 wiedergegebenen Ergebnissen aus Messungen auf der *Albtalbahn* wurde experimentell ein mittlerer Schwellenabstand von ca. 64 bis 65 cm ermittelt.

Im Bereich einer Weiche sind zwei Effekte auf das Sensorsignal maßgeblich: Die Abstände der Schwellen variieren vor allem im Bereich der Stellvorrichtung (Schwellen 1 und 2) und kurz vor dem Herzstück (Schwellen 33 bis 36) wesentlich stärker als auf der freien Strecke. Bei der in Abb. 2.15 als Verlegeplan dargestellten einfachen Weiche EW 190-1:¹⁵ sind die einzelnen Schwellenabstände jeweils eingezeichnet.

¹⁵Aus dem Kürzel geht hervor, dass es sich um eine einfache Weiche handelt, welche im abzweigenden Strang einen Bogenradius von 190 m und eine Endneigung gegenüber dem geraden Strang von 1:7 besitzt.

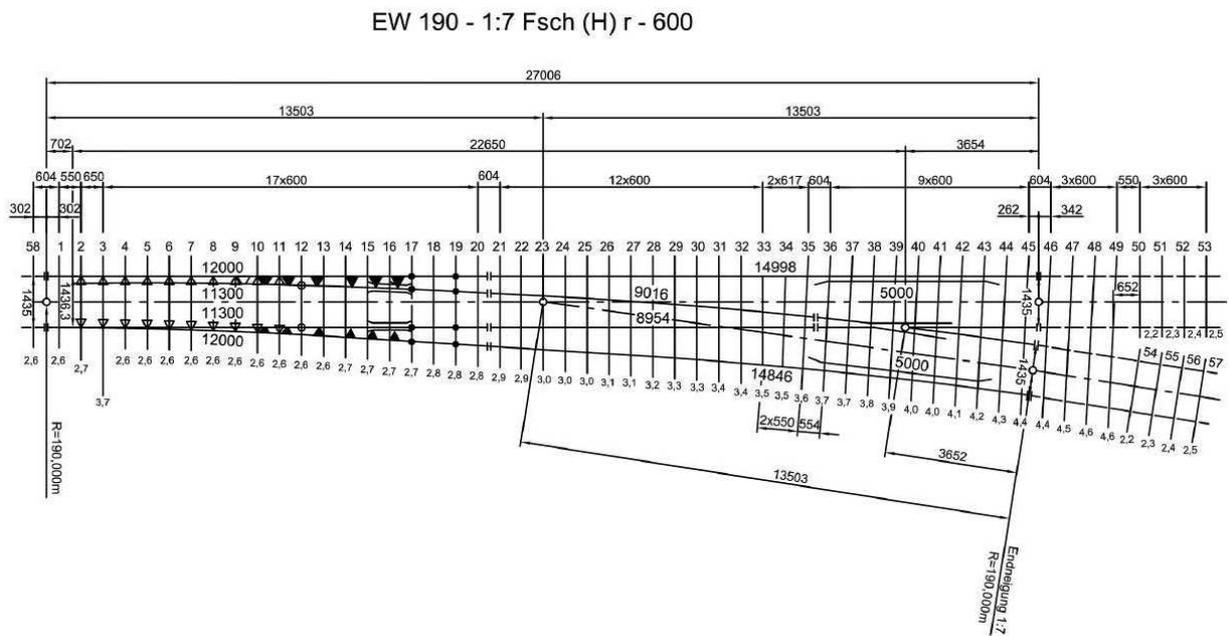


Abbildung 2.15: Verlegeplan einer einfachen Weiche EW 190-1:7; Quelle: [57].

Die aus den Verlegeplänen [57] ermittelten Daten für den mittleren Schwellenabstand im geraden Strang der Weiche, die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte sowie die entsprechende Standardabweichung sind in Tabelle 2.1 für die gängigsten Weichentypen aufgelistet.

Tabelle 2.1: Mittlere Schwellenabstände \bar{x}_{cl} und zugehörige Standardabweichungen $\sigma_{x_{cl}}$, alle Längenangaben in Millimeter.

Weichentyp	\bar{x}_{cl}	$x_{cl,min}$	$x_{cl,max}$	$\sigma_{x_{cl}}$
EW 140-1:7	595	550	650	15
EW 190-1:7	600	550	650	13
EW 190-1:9	600	550	650	12
EW 300-1:9	604	550	650	12
EW 500-1:12	602	550	650	16

Des Weiteren werden im Bereich der markanten Weichenbauteile die Signale der Schienenbefestigungen weitgehend überdeckt. Das resultierende Leistungsdichtespektrum beim Befahren einer Weichenzunge ist beispielhaft in Abb. 2.16 dargestellt.

Beim Passieren einer Weiche ist im Leistungsdichtespektrum, wie aus Abb. 2.16 ersichtlich, kein signifikantes Maximum erkennbar. Auch kann ein, wie in Abb. 2.8 gezeigt, von außen aufgeprägtes Störsignal die Messung verfälschen.

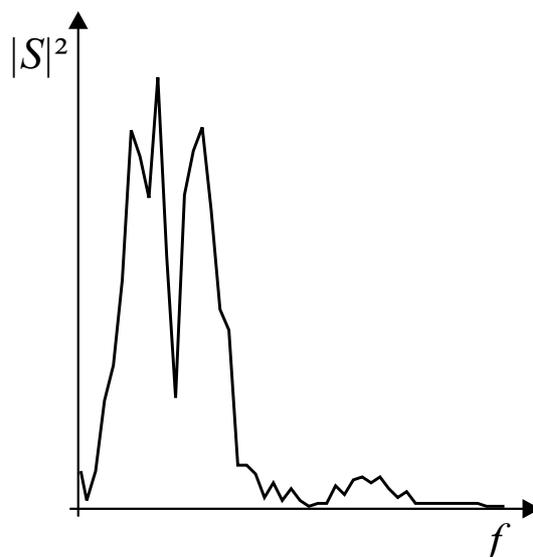


Abbildung 2.16: Leistungsdichtespektrum $|S|^2(f)$; gemessen im Bereich einer Weichenzunge.

Diese Störungen wirken sich oftmals allerdings nur in einem Kanal aus, so dass die Geschwindigkeit mit dem anderen Kanal weiterhin gemessen werden kann.

In beiden Fällen muss durch eine Plausibilitätsprüfung sichergestellt werden, dass keine falschen Geschwindigkeitswerte ausgegeben werden. Neben einer Fehlerbetrachtung wird in Abschnitt 2.4.2 auch auf die Plausibilitätsprüfung eingegangen.

2.4.1.2 Zählen der Nulldurchgänge

Prinzipiell würde es genügen, analog zu [44] einfach die Nulldurchgänge des Signals zu zählen, was eine wesentliche Reduktion des Rechenaufwands zur Folge hätte. Ein weiterer Vorteil wäre, dass bereits nach maximal einem Schwellenabstand ein Messwert vorliegen würde. Bei diesem Verfahren wird ausgenutzt, dass sich für schmalbandige Signale die Frequenz f_N der Nulldurchgänge proportional zur Mittenfrequenz f_M verhält. Für die Signale des Wirbelstrom-Sensors gilt diese Eigenschaft daher ausschließlich für die freie Strecke, wie im in Abb. 2.14 dargestellten Spektrum zu sehen ist. Im Weichenbereich hingegen ist das Signal nicht mehr schmalbandig, was in Abb. 2.16 zu erkennen ist. Da allerdings, wie in Kapitel 3 beschrieben, Weichen im Signal detektiert werden können, ist es möglich, die Messung in diesen Bereichen abzuschalten. Mit dem Zählen der Nulldurchgänge lässt sich, ebenso wie mit der Maximumsuche, ein Schätzwert für Geschwindigkeit gewinnen, mit dem der Korrelator überwacht werden kann.

2.4.1.3 Maxima der Autokorrelationsfunktion

Die Positionen T_i der Maxima der Autokorrelationsfunktion (AKF)

$$\Phi_{11} = \lim_{T_M \rightarrow \infty} \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} s_1(t - \tau) s_1(t) dt \quad (2.15)$$

sind umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit:

$$T_i = \frac{i}{f_0} = \frac{i \cdot \bar{x}_{cl}}{v} \quad (i = 1, 2, \dots, N - 1). \quad (2.16)$$

Somit lässt sich die Geschwindigkeit analog zu (2.14) berechnen:

$$v_i = \frac{i \cdot \bar{x}_{cl}}{T_i} \quad (i = 1, 2, \dots, N - 1). \quad (2.17)$$

Dabei kann \bar{v}_{AKF} als Mittelwert aus den einzelnen v_i berechnet werden.

2.4.1.4 Abstand der Nulldurchgänge der Kreuzkorrelationsfunktion

Die in den vorigen Abschnitten beschriebenen Verfahren lassen sich auch auf die KKF Φ_{12} der Sensorsignale bzw. das Kreuzleistungsdichtespektrum anwenden. Der Vorteil der KKF gegenüber der AKF ist, dass Störsignale in den seltensten Fällen in beiden Kanälen korreliert auftreten. Allerdings erfordert die Messung, wie auch die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Laufzeit-Korrelation, stets gut korrelierte Sensorsignale. Folglich ist eine Messung bei Ausfall eines Kanals nicht mehr möglich und die prinzipiell vorhandene Redundanz geht verloren.

Bei der Laufzeit-Korrelation periodischer Signale bestehen mitunter zwei Einschränkungen. Bei der Verwendung eines OLC kann es vorkommen, dass das absolute Maximum der KKF nicht das mit der niedrigsten Laufzeit ist, sondern eigentlich ein Nebenmaximum. Beim CLC besteht die Gefahr, dass sich der Korrelator auf ein Nebenmaximum einschwingt und damit falsche Messwerte liefert bzw. instabil wird. Der Wert für die Laufzeit T und die daraus berechnete Geschwindigkeit lässt sich in einem solchen Fall mit dem Abstand zwischen den Nulldurchgängen der KKF auf Plausibilität prüfen. Diese Plausibilitätsprüfung wird selbstverständlich im Weichenbereich versagen, allerdings liegen in diesem Fall auch keine periodischen Sensorsignale vor, so dass sowohl beim OLC als auch beim CLC die KKF ein eindeutiges Maximum besitzt und der Korrelator somit auf jeden Fall die richtige Laufzeit liefern wird.

2.4.2 Fehlerbetrachtung

Um die jeweiligen Geschwindigkeitswerte sinnvoll weiterverarbeiten zu können, ist eine Angabe der zum Messwert zugehörigen Messgenauigkeit erforderlich. Gemäß Gleichung (2.14) muss zur Bestimmung der Messunsicherheit $\sigma_{\hat{v}_{\text{Freq}}}$ der Einfluss der Frequenzmessung der Frequenz f_0 und der Unsicherheit des mittleren Schwellenabstands \bar{x}_{cl} betrachtet werden. Unter Annahme der Unkorreliertheit zwischen der Unsicherheit der Frequenzanalyse und der des Schwellenabstands lässt sich das totale Differential der Geschwindigkeit

$$d\hat{v}_{\text{Freq}} = \left(\frac{\partial \hat{v}_{\text{Freq}}}{\partial f_0} \right) df_0 + \left(\frac{\partial \hat{v}_{\text{Freq}}}{\partial \bar{x}_{\text{cl}}} \right) d\bar{x}_{\text{cl}}, \quad (2.18)$$

bzw. die zugehörige resultierende Varianz

$$\sigma_{\hat{v}_{\text{Freq}}}^2 = \left(\frac{\partial \hat{v}_{\text{Freq}}}{\partial f_0} \right)^2 \cdot \sigma_{f_0}^2 + \left(\frac{\partial \hat{v}_{\text{Freq}}}{\partial \bar{x}_{\text{cl}}} \right)^2 \cdot \sigma_{\bar{x}_{\text{cl}}}^2 \quad (2.19)$$

nach dem Gesetz der linearen Fehlerfortpflanzung bilden. Hieraus ergibt sich nach Einsetzen der partiellen Ableitungen

$$\sigma_{\hat{v}_{\text{Freq}}}^2 = \bar{x}_{\text{cl}}^2 \cdot \sigma_{f_0}^2 + f_0^2 \cdot \sigma_{\bar{x}_{\text{cl}}}^2. \quad (2.20)$$

Folglich setzt sich die relative Varianz der Geschwindigkeitsmessung

$$\frac{\sigma_{\hat{v}_{\text{Freq}}}^2}{\hat{v}_{\text{Freq}}^2} = \frac{\sigma_{f_0}^2}{f_0^2} + \frac{\sigma_{\bar{x}_{\text{cl}}}^2}{\bar{x}_{\text{cl}}^2} \quad (2.21)$$

additiv aus den relativen Varianzen $\sigma_{f_0}^2$ der Frequenzanalyse und $\sigma_{\bar{x}_{\text{cl}}}^2$ des Schwellenabstands zusammen. In den folgenden beiden Unterabschnitten werden diese beiden Messunsicherheiten jeweils grob abgeschätzt.

2.4.2.1 Messunsicherheit bei der Bestimmung der Maximumfrequenz

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Abschätzung der Standardabweichung σ_{f_0} der Frequenzanalyse vorgenommen. Zur genauen Berechnung dieser Standardabweichung basierend auf Gleichung (2.13) müsste die nichtlineare Eigenschaft der $\arg \max$ -Funktion berücksichtigt werden. Vereinfachend soll die im folgenden vorgenommene Abschätzung dieser Messunsicherheit nach oben zunächst genügen, um deren Größenordnung gegenüber der Messunsicherheit des Schwellenabstands zu bestimmen.

Bei der in Abschnitt 2.4.1.1 beschriebenen Maximumsuche im Spektrum (dargestellt in Abb. 2.14) ist durch eine ausreichend große Abtastfrequenz f_A und Verwendung einer Hanning-Fensterfunktion sichergestellt, dass keine nennenswerten Aliasing- oder Leckeffekte auftreten. Somit hat lediglich die Auflösung Δf im Frequenzbereich einen Einfluss auf die Messunsicherheit σ_{f_0} , da nur eine endliche Anzahl von Stützstellen im Spektrum vorhanden ist [52]. Das eigentlich kontinuierliche Spektrum wird auf eine endliche Anzahl diskreter Frequenzen aufgeteilt; die Messabweichung

$$\epsilon = \hat{f}_0 - f_0 \quad (2.22)$$

entspricht damit einem Quantisierungsrauschen, welches als gleichverteilt und mittelwertfrei angenommen werden kann [56]. Die damit resultierende Varianz

$$\begin{aligned} \sigma_{f_0}^2 = E\{\epsilon^2\} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon^2 p_\epsilon(\epsilon) d\epsilon = \int_{-\frac{\Delta f}{2}}^{+\frac{\Delta f}{2}} \epsilon^2 \frac{1}{\Delta f} d\epsilon = \frac{1}{3\Delta f} \cdot [\epsilon^3]_{-\frac{\Delta f}{2}}^{+\frac{\Delta f}{2}} \\ &= \frac{1}{3\Delta f} \cdot \left[\frac{(\Delta f)^3}{8} - \left(-\frac{(\Delta f)^3}{8} \right) \right] = \frac{(\Delta f)^2}{12} \end{aligned} \quad (2.23)$$

bzw. die Standardabweichung

$$\sigma_{f_0} = \sqrt{E\{\epsilon^2\}} = \sqrt{\frac{(\Delta f)^2}{12}} = \frac{\Delta f}{2\sqrt{3}} \quad (2.24)$$

der Maximumsuche im Spektrum ist nur noch abhängig von der Frequenzauflösung Δf , welche sich aus dem Quotienten der Grenzfrequenz f_{gr} und der Anzahl der Stützstellen N_f im Spektrum ergibt:

$$\Delta f = \frac{f_{\text{gr}}}{N_f} = \frac{f_{\text{gr}}}{T_M \cdot f_{\text{gr}}} = \frac{1}{T_M} \quad (2.25)$$

Hierbei ist der verbleibende Parameter die Messzeit T_M bzw. Länge des gefesterten Signals im Zeitbereich. Durch ein Zero-Padding des Signals $s(t)$ im Zeitbereich kann die Frequenzauflösung Δf durch Vergrößerung der Fensterlänge bei gleichbleibender Messzeit T_M weiter verbessert werden, so dass sich der Wert von σ_{f_0} entsprechend minimieren lässt.

2.4.2.2 Messunsicherheit aufgrund des variierenden Schwellenabstands

Ein variierender Schwellenabstand \bar{x}_{cl} hat, wie aus Gl. 2.21 hervorgeht, ebenso wie eine Messabweichung bei der Bestimmung der Maximumfrequenz im Spektrum, einen direkten Einfluss auf die Messunsicherheit der Frequenzanalyse. Der Wert von \bar{x}_{cl} und die zugehörige Standardabweichung $\sigma_{\bar{x}_{cl}}$ können im allgemeinen aus den Solldaten der Strecke entnommen werden, z. B. aus dem Verlegeplan einer Weiche (Abbildung 2.15). Für die wichtigsten Weichentypen sind die Werte in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Der Maximalwert für $\sigma_{\bar{x}_{cl}}$ beträgt etwa 16 mm, was einer relativen Standardabweichung von etwa 2,6 % entspricht.

Der Schwellenabstand von Gleisen außerhalb des Bereichs von Weichen sollte in der Regel 60 cm betragen. Dass dies insbesondere bei Nebenstrecken nicht immer der Fall sein muss, zeigen die Ergebnisse von Messungen auf der *Albtalbahn*. In Abb. 2.17 ist der Verlauf der Maximumfrequenz eines Sensorkanals bei einer Testfahrt wiedergegeben.

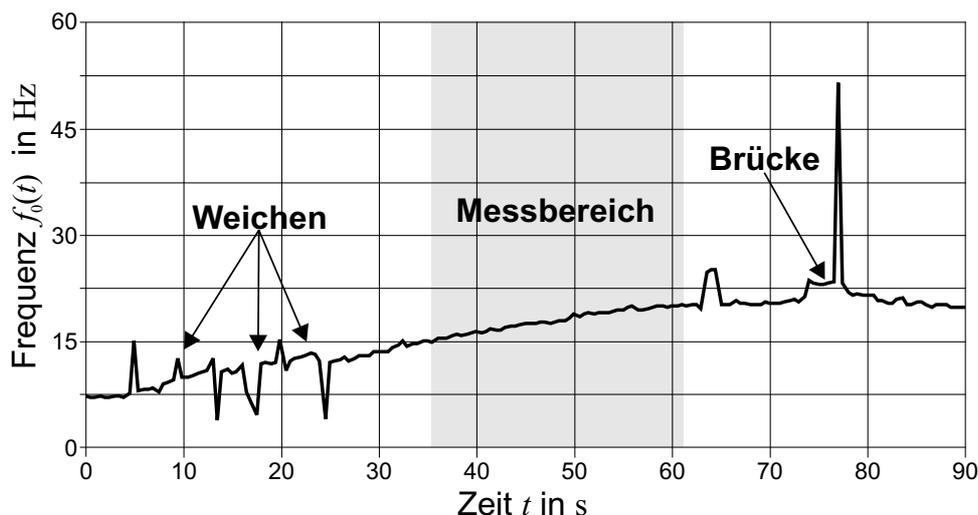


Abbildung 2.17: Verlauf der Maximumfrequenz bei Messungen auf einer Teilstrecke der *Albtalbahn*.

Deutlich zu erkennen sind einzelne Ausreißer im Bereich der Weichen und anderer herausragender Bauteile. In diesen Bereichen ist die Messung des Schwellenabstands offensichtlich nicht sinnvoll. Für den grau markierten Bereich wurde mithilfe der mit dem Korrelator gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit der mittlere Schwellenabstand

$$\bar{x}_{cl} = \frac{v_{\text{korr}}}{f_0} \quad (2.26)$$

bestimmt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 2.18 dargestellt.

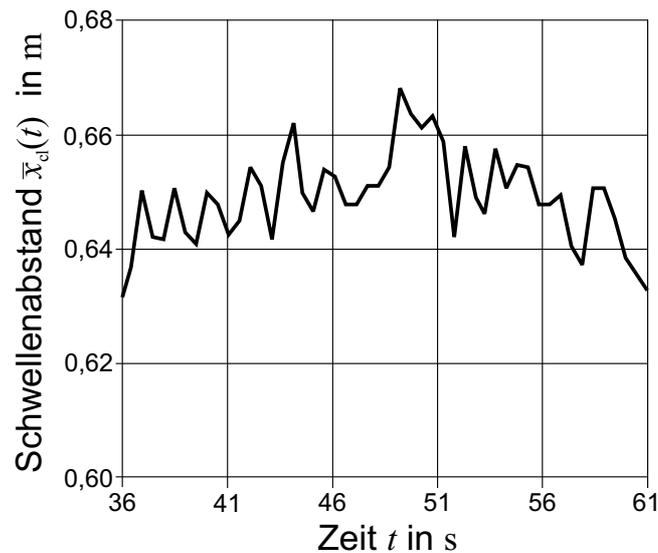


Abbildung 2.18: Aus Messdaten experimentell ermittelter Schwellenabstand; $\bar{x}_{cl}=0,649$ m, $\sigma_{\bar{x}_{cl}}=0,008$ m.

Der hier gemessene, vergleichsweise große mittlere Schwellenabstand \bar{x}_{cl} von etwa 65 cm macht deutlich, dass für eine genaue Geschwindigkeitsmessung unbedingt Vorwissen über die zu befahrene Infrastruktur vorhanden sein muss, da ansonsten die Messung mit einem Bias behaftet wäre. Die Streuung der Messwerte $\sigma_{\bar{x}_{cl}}$ von etwa 8 mm liegt im Bereich der Verlegegenauigkeit. Liegt kein Vorwissen über den mittleren Schwellenabstand vor, so kann dieser mit der korrelativ gemessenen Geschwindigkeit zur Laufzeit bestimmt und auch gegebenenfalls gleitend nachgeführt werden.

2.4.2.3 Fazit zur Bestimmung der Messunsicherheit

Ein Vergleich der Einflüsse auf die Messunsicherheit zeigt, dass die Messabweichung aufgrund des Quantisierungsrauschens durch eine Verfeinerung der Auflösung im Frequenzbereich minimiert werden kann. Berücksichtigt man einen variierenden Schwellenabstand, so beträgt auch unter günstigsten Bedingungen die relative Messunsicherheit mehr als 1 %, sofern der mittlere Schwellenabstand \bar{x}_{cl} genau bekannt ist. Falls dies nicht der Fall sein sollte, so ist – bei Annahme einer Gleichverteilung von \bar{x}_{cl} in einem Wertebereich von 0,60 bis 0,66 m – von einer mittleren Standardabweichung von etwa 3 % auszugehen. Eine wichtige Voraussetzung für sinnvolle Messwerte ist allerdings eine eindeutige und richtige Maximumfrequenz im Spektrum. Insbesondere müssen die Bereiche, in denen Weichen befahren werden, ausgeblendet werden. Die Gültigkeit der Messung muss daher mit der Bestimmung eines Qualitätsfaktors überprüft werden.

2.4.2.4 Bestimmung eines geeigneten Qualitätsfaktors

Zur Berechnung der Güte der Messungen der Frequenzanalyse wurden bei einer Messfahrt deren Geschwindigkeitswerte mit denen des Korrelators verglichen. Der Verlauf der relativen Messabweichung

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\hat{v}_{\text{Freq}} - v_{\text{korr}}}{v_{\text{korr}}} \quad (2.27)$$

der experimentell ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit v ist in Abb. 2.19 wiedergegeben.

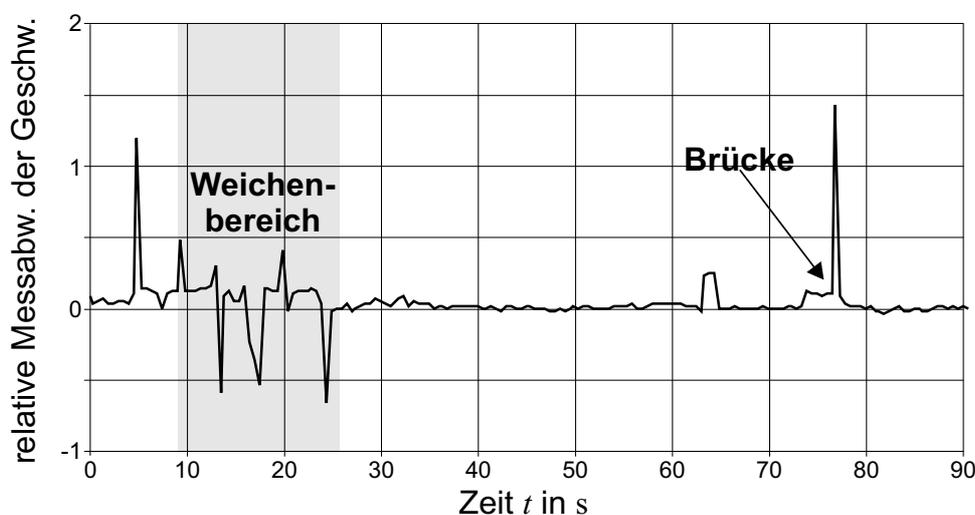


Abbildung 2.19: Relative Messabweichung $\Delta v/v$ der Geschwindigkeit zwischen Frequenzanalyse und Korrelator, $\bar{x}_{cl} = 65$ cm.

Aus den Messungen ergibt sich, dass die Messabweichung vor allem im Bereich von Weichen sehr groß werden kann, da die Qualität der geschätzten Geschwindigkeitswerte sehr stark von einem klaren Maximum der Schwellenfrequenz abhängt. Wie bereits in Abb. 2.16 dargestellt, sind die Peaks im Spektrum beim Befahren einer Weiche wesentlich breiter als auf der freien Strecke. Daher ist die Bestimmung eines Wertes für die Signalqualität – hier repräsentiert von einer möglichst deutlichen Ausprägung des Frequenzmaximums – wichtig, um z. B. die Messungen im Bereich von Weichen ausblenden zu können. Hierfür lassen sich zwei Qualitätswerte Q_1 und Q_2 definieren, von denen der die Schmalbandigkeit des Signals, der andere das Vorhandensein der ersten Oberwelle bei der Frequenz f_1 abprüft.

Zur Berechnung des Qualitätsfaktors Q_1 wird der Anteil des Nutzsignals P_{cl} der Schienenbefestigungen an der Gesamtleistung – hier repräsentiert durch die Leistungen P_{f_0} , P_{f_1} bzw. P_{f_2} in einem schmalen Band um die jeweiligen Frequenzen

f_0 , f_1 und f_2 – auf die Gesamtleistung des Signals bezogen. Der sich hieraus ergebende Qualitätsfaktor

$$Q_1 = \frac{P_{f_0} + P_{f_1} + P_{f_2}}{P_{\text{ges}}} = \frac{P_{\text{cl}}}{P_{\text{ges}}} \quad (2.28)$$

erreicht somit Werte zwischen null und eins, entspricht einem Signal-Rausch-Verhältnis¹⁶ und lässt sich aus dem Spektrum (Abb. 2.14) bestimmen.

Ein weiteres Merkmal für die Qualität der Messung liefert eine Plausibilitätsprüfung, welche das Vorhandensein der ersten Oberwelle bei der Frequenz f_1 – im Leistungsdichtespektrum als zweites Maximum zu erkennen – abprüft. Wie in Abschnitt 2.4.1.1 dargelegt, sollte f_1 genau doppelt so groß sein wie f_0 . Der Wertebereich des zweiten Qualitätsfaktors

$$Q_2 = \begin{cases} 1 - \frac{|\frac{f_1}{2} - f_0|}{f_0} & \text{für } f_1 \leq 4 \cdot f_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.29)$$

liegt ebenfalls zwischen null und eins, so dass der resultierende Schätzwert für die Signalqualität

$$Q_{\text{Freq}} = (g_1 \cdot Q_1 + g_2 \cdot Q_2) \quad (2.30)$$

mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren g_1 und g_2 berechnet werden kann. Das Vorhandensein einer eindeutigen Oberwelle, d. h. eines scharfen Peaks im Spektrum bei $f_1 = 2f_0$, ist eine notwendige Voraussetzung, dass der wesentliche Anteil des Signals von Schienenbefestigungen hervorgerufen wird. Praktische Erfahrungen bei verschiedenen Messungen haben gezeigt, dass dies wesentlich wichtiger als ein gutes SNR ist, somit sollte Q_2 das größere Gewicht erhalten. Anhand von Messungen haben sich $g_1 = 0,3$ und $g_2 = 0,7$ als sinnvolle Gewichtungsfaktoren gezeigt. Den Verlauf dieses Qualitätsfaktors bei der Messfahrt zeigt Abb. 2.20.

Hier wird der Charakter des Qualitätsfaktors nochmals deutlich: Er ermöglicht die Entscheidung, ob eine Geschwindigkeitsmessung verwendet werden kann (freie Strecke) oder verworfen werden sollte (Weichenbereich, Störungen).

Die sich hieraus ergebende empirische Standardabweichung

$$\sigma_{\text{Freq}} = \frac{\sigma_{\hat{v}_{\text{Freq}}}}{Q_{\text{Freq}}} \approx \frac{f_0 \cdot \sigma_{\bar{x}_{\text{cl}}}}{Q_{\text{Freq}}} \quad (2.31)$$

¹⁶Als Nutzsignal sind die von den Schienenbefestigungen erzeugten Signale zu verstehen, als Rauschen die von den übrigen Bauteilen erzeugten.

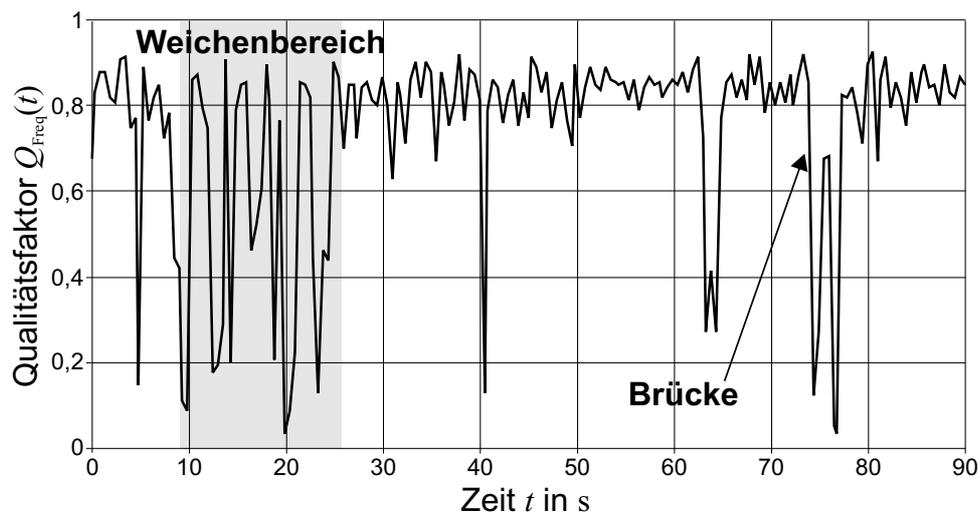


Abbildung 2.20: Verlauf des Qualitätsfaktors im dargestellten Beispiel.

kann mit dem zuvor berechneten theoretisch möglichen Wert für $\sigma_{\bar{x}_{cl}}$ abgeschätzt werden und z. B. an nachgeschaltete Fusionsstufen weitergegeben werden, wobei bei ausreichend hoher Frequenzauflösung der Beitrag von σ_{f_0} zur Messunsicherheit vernachlässigt werden kann. Die praktischen Messergebnisse der Frequenzanalyse auf der Teststrecke sind in Abschnitt 2.5.2 dargestellt.

2.5 Fusion der diversitären Geschwindigkeitswerte

In den vorangegangenen Abschnitten wurden zwei unterschiedliche Messverfahren vorgestellt, mit denen die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs mit Wirbelstrom-Sensoren gemessen werden kann. Die einzelnen Messergebnisse sollen nun gewichtet zu einem Gesamtergebnis kombiniert werden. Hierbei ist es sinnvoll, die Kinematik des Fahrzeugs, welches sich in der Regel zwischen den Messungen bewegen wird, zu modellieren und so eine optimale Schätzung der Geschwindigkeit und der zugehörigen Kovarianz über mehrere Zeitschritte hinweg zu ermöglichen. Eine gängige Möglichkeit zur rekursiven Berechnung dieser Größen bietet das Kalman-Filter [62].

2.5.1 Systemkonzept

In diesem Abschnitt wird auf die grundlegenden Ideen und Zusammenhänge einer Fusion auf Datenebene mittels eines Kalman-Filters eingegangen. Aus den Eingangsgrößen, den Messwerten für die Fahrzeuggeschwindigkeit v_{clc} des Closed-

loop-Korrelators (CLC) und $v_{\text{Freq},1}$ bzw. $v_{\text{Freq},2}$ der Frequenzanalyse, wird der Systemzustand, repräsentiert durch den Systemzustandsvektor

$$\mathbf{y}_k = (x_k, v_k, a_k)^T, \quad (2.32)$$

geschätzt, welcher sich aus dem gefahrenen Weg x_k sowie der Geschwindigkeit v_k und der Beschleunigung a_k des Fahrzeugs jeweils zum Zeitpunkt k zusammensetzt. Zu jedem Zustand wird außerdem die Messunsicherheit als Kovarianzmatrix \mathbf{P}_k angegeben. Abbildung 2.21 zeigt als Übersicht die einzelnen Verarbeitungsschritte des Kalman-Filters.

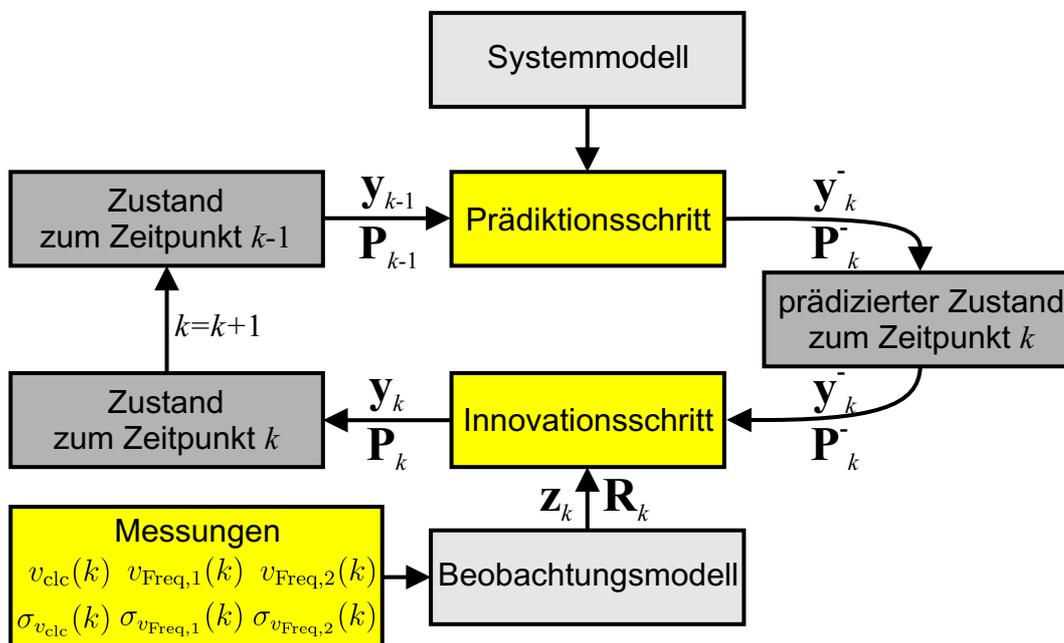


Abbildung 2.21: Konzept zur Fusion mehrerer Geschwindigkeitsmessungen mit einem Kalman-Filter.

Damit Messwerte veränderlicher Größen über mehrere Zeitschritte hinweg gemittelt werden können, wird im *Prädiktionsschritt* des Kalman-Filters zunächst aus dem vergangenen Zustand \mathbf{y}_{k-1} und der Kovarianzmatrix \mathbf{P}_{k-1} mithilfe des Systemmodells eine Vorhersage über den aktuellen Zustand \mathbf{y}_k^- und die Kovarianz \mathbf{P}_k^- getroffen.

Diese Prädiktion wird im *Innovationsschritt* mit den im Beobachtungsvektor \mathbf{z}_k enthaltenen Messwerten für die Geschwindigkeit v aus Korrelator und Frequenzanalyse verglichen. Voraussetzung hierfür ist, dass zu den einzelnen Messwerten für die Geschwindigkeit jeweils auch eine Standardabweichung σ_v als Gütemaß angegeben wird. Beobachtung und Prädiktion werden dann, entsprechend ihrer Güte – repräsentiert durch den Werten zugeordnete Kovarianzen \mathbf{R}_k bzw. \mathbf{P}_k^- –

gewichtet, zum neuen Zustand y_k kombiniert. Zusätzlich wird zu jedem Zustand auch die zugehörige Kovarianz P_k geschätzt, so dass das Kalman-Filter zudem eine Aussage über die Güte der Messung trifft.

Alle wichtigen Rechenschritte im einzelnen sowie die verwendeten Modelle für die Beobachtungs- und die Systemgleichung sind im Anhang A.3 sowie in [28] beschrieben.

2.5.2 Messergebnisse

Mit den folgenden Beispielmessungen soll der Messbetrieb mit dem Wirbelstrom-Sensor und der Auswertung der Geschwindigkeit mit dem im vorigen Abschnitt dargestellten Kalman-Filter anhand von realen Sensordaten demonstriert werden. Das in Abb. 2.22 dargestellte reale Testsignal wurde bei einer Beschleunigung des Fahrzeugs aus dem Stillstand auf etwa 18 m/s aufgenommen. Hierbei wurden nacheinander auch vier Weichen befahren. Zwischen diesen entspricht das Gleis dem der freien Strecke, es sind also nur die einfachen Schienenbefestigungen vorhanden.

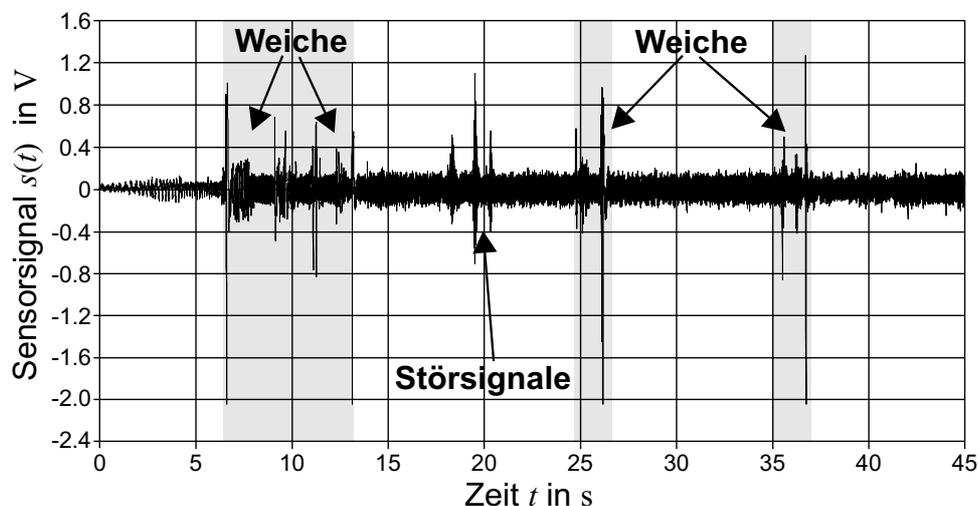


Abbildung 2.22: Für die Beispielmessungen verwendetes reales Testsignal, gewonnen auf einer Teilstrecke der *Albtalbahn*.

Die Qualität des Sensorsignals ändert sich geringfügig beim Befahren von Weichen und Kurven. Dies ist auf seitliche Bewegungen des Sensorgehäuses zurückzuführen, welches am beweglichen Drehgestell des Schienenfahrzeugs angebracht ist. Dieser Effekt wird insbesondere bei dem in Abb. 2.22 dargestellten Testsignal im Bereich der Weichen sichtbar. Die Weichenbauteile sind an den im Vergleich zu den Schienenbefestigungen deutlich höheren Signalamplituden

gut zu erkennen. Im Bereich von etwa etwa 20 Sekunden ist ein Störsignal einer Tonfrequenz-Gleisfreimeldeanlage ersichtlich, welches im 20-kHz-Kanal wesentlich deutlicher ausgeprägt ist, als im 30-kHz-Kanal¹⁷.

Dieses Testsignal wurde mit den in den vorigen Abschnitten vorgestellten Verfahren untersucht, und es wurde ein Geschwindigkeitsverlauf berechnet. Die Messzeit beim CLC bzw. das Zeitfenster bei der Frequenzanalyse betragen jeweils 0,5 Sekunden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Messverfahren und das der Datenfusion dargestellt.

Abbildung 2.23 zeigt den mit dem Korrelator ermittelten Geschwindigkeitsverlauf. Das Fahrzeug wurde aus dem Stand in etwa 35 Sekunden auf einen Wert von etwas über 18 m/s beschleunigt.

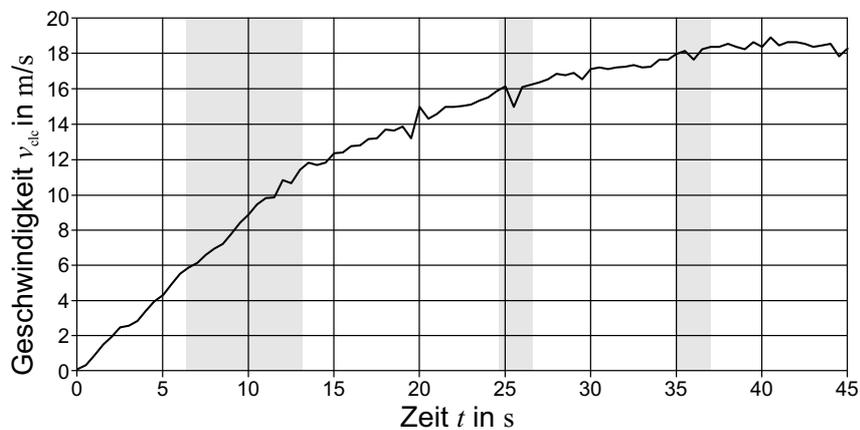


Abbildung 2.23: Mit dem Korrelator ermittelter Geschwindigkeitsverlauf.

An einigen Punkten ist die Streuung der Geschwindigkeitswerte augenscheinlich größer, insbesondere bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten, im Bereich von Weichen – hier bei 12, 25 und 35 Sekunden – und bei der bei oben erwähnter Störung im Sensorsignal bei etwa 20 Sekunden. Dass die Signalqualität an diesen Stellen offensichtlich geringer ist als im restlichen Signal, wird beim Analysieren des in Abb. 2.24 wiedergegebenen Verlaufs des Kreuzkorrelationskoeffizienten deutlich.

In allen Fällen, in denen der Korrelationskoeffizient auf unter 70 % fällt, ist die Geschwindigkeitsmessung bereits mit starken Unsicherheiten behaftet, bei Werten unter 50 % ist oftmals keine sinnvolle Geschwindigkeitsmessung mehr möglich. Man erkennt in Abb. 2.24 jeweils einen leichten Abfall des sonst sehr hohen Korrelationskoeffizienten im Bereich der Weichen, jedoch einen starken

¹⁷Dies lässt sich mit der Tatsache erklären, dass die Gleisfreimeldeanlage mit Frequenzen von 10 kHz arbeitet und deren Oberwellen den 20-kHz-Kanal stören. Der 30-kHz-Kanal ist in der Regel weniger beeinträchtigt. Abhilfe schafft hier eine Erregerfrequenz, welche nicht exakt 20 bzw. 30 kHz beträgt, sondern etwas darüber, z. B. 21,67 und 30,57 kHz.

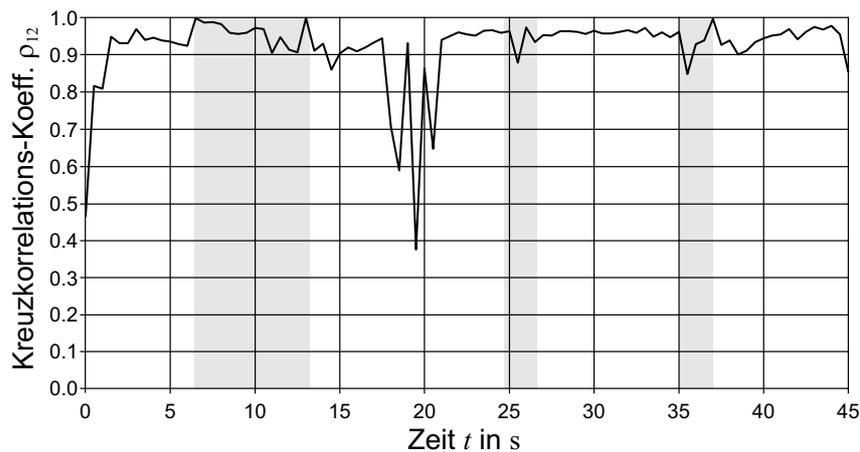


Abbildung 2.24: Verlauf des Kreuzkorrelationskoeffizienten.

Abfall im Bereich der externen Störung. Für extrem niedrige Geschwindigkeiten ergäbe sich eine extrem hohe Korrelatorlaufzeit. Da diese jedoch durch die Signalverarbeitung begrenzt ist, sind diese niedrigen Geschwindigkeiten ebenfalls schwierig zu erfassen. Hinzu kommt, dass das in der Inneneinheit eingebaute Hochpassfilter mit der eingestellten Eckfrequenz von 3,3 Hz Signale unterhalb einer Geschwindigkeit von 1,2 m/s zu großen Teilen unterdrückt.

Zusätzlich zur korrelativen Messung wird die Fahrzeuggeschwindigkeit anhand der Maximumfrequenz geschätzt. Da dies kanalweise geschieht, ist selbst bei Ausfall eines Sensorkanals mit dem verbleibenden Kanal noch eine Messung möglich, wohingegen der Korrelator zwei funktionierende Kanäle benötigt. Der Geschwindigkeitsverlauf, welcher aus der Frequenzanalyse der Sensorkanäle gewonnen wurde, ist in Abb. 2.25 dargestellt. Auf der für die Tests ausgewählten Strecke betrug die Distanz \bar{x}_{cl} zwischen den Schwellen im Mittel etwa 64 cm.

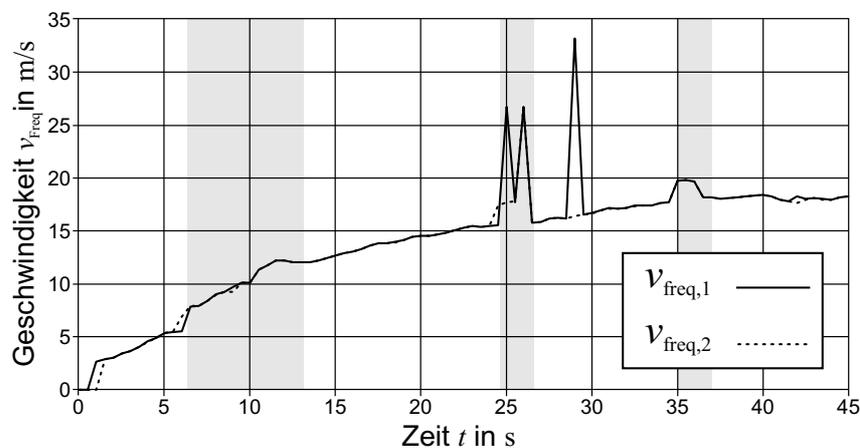


Abbildung 2.25: Mit der Frequenzanalyse ermittelter Geschwindigkeitsverlauf.

Es wird deutlich, dass die Frequenzanalyse im Bereich von Weichen mitunter falsche Geschwindigkeitswerte liefert. So wird in diesem Beispiel die Geschwindigkeit im Weichenbereich um 10 bis 20 % zu hoch gemessen, was daran liegt, dass die Schienenbefestigungen im Bereich der Weiche einen geringeren Abstand haben als auf der freien Strecke. Die Annahme, dass \bar{x}_{cl} konstant ist, gilt daher im Weichenbereich nicht. Zudem kann es aufgrund der Charakteristik der Weichenbauteile auch zu gänzlich falschen Messergebnissen kommen, diese sind in Abb. 2.25 als Peaks im Geschwindigkeitsverlauf zu erkennen. Diese Peaks sind z. T. auch nur in einem Kanal vorhanden, so dass der andere Kanal durchaus sinnvolle Werte liefern kann.

Für eine korrekte Fusion der Geschwindigkeitsmesswerte ist wichtig, dass solche schlechten Messungen das Gesamtergebnis nicht signifikant beeinflussen. Hierzu liefert der Verlauf der gemäß Abschnitt 2.4.2.4 empirisch ermittelten Qualitätsfaktoren der Frequenzanalyse, welcher in Abb. 2.26 wiedergegeben ist, eine bedeutsame Aussage.

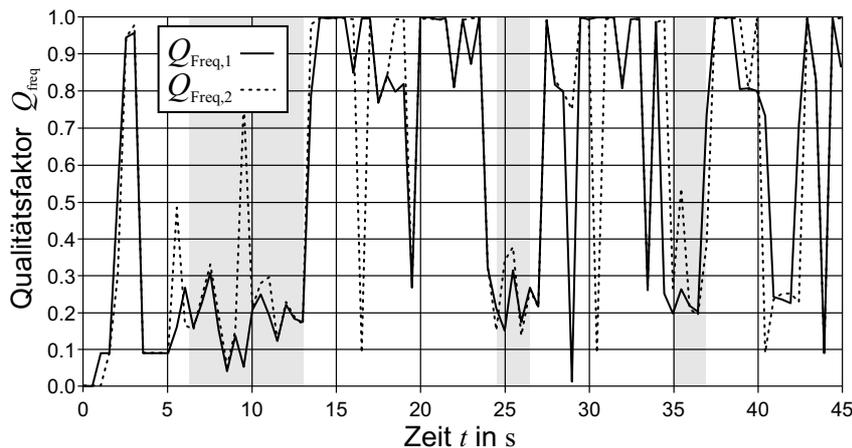


Abbildung 2.26: Verlauf der gemäß Abschnitt 2.4.2.4 ermittelten Qualitätswerte der Frequenzanalyse.

Man erkennt deutlich, dass im Bereich von Weichen der Qualitätsfaktor immer niedrig ist; hingegen nimmt er in Bereichen ohne Weichenbauteile hohe Werte, oftmals nahe eins an. Hier wird vor allem der wesentliche Einfluss des Kriteriums der vorhandenen Oberwelle (siehe Abschnitt 2.4.2) offensichtlich, so dass Messungen der Frequenzanalyse im Weichenbereich ausgeblendet werden und damit das Gesamtergebnis nicht mehr beeinflussen. In diesen Fällen wird der Korrelator stets wesentlich bessere Ergebnisse liefern.

Abschließend werden alle Messwerte mit ihrer Standardabweichung gewichtet im Kalman-Filter fusioniert. Der in Abb. 2.27 dargestellte resultierende Geschwindigkeitsverlauf entspricht im wesentlichen dem des Korrelators. Hier zeigt sich

die höhere Gewichtung der Laufzeit-Korrelation gegenüber der Frequenzanalyse insbesondere im Weichenbereich.

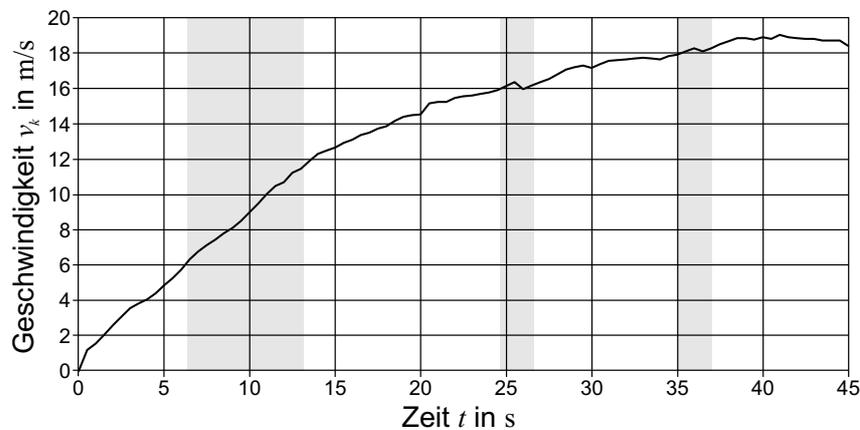


Abbildung 2.27: Aus dem Kalman-Filter resultierender Geschwindigkeitsverlauf: Die Nutzung diversitärer Messmethoden verbessert die Messergebnisse.

Wie aus den dargestellten Messergebnissen hervorgeht, hängt die Güte der Fusionsergebnisse vorwiegend von der Güte der Geschwindigkeitswerte des Korrelators ab; die Messergebnisse der Frequenzanalyse haben aufgrund ihrer zumeist höheren Streuung keinen großen Einfluss auf das Fusionsergebnis.

Lediglich bei Ausfall eines Sensorkanals, z. B. durch von außen aufgeprägte Störungen im Sensorsignal, kann der Korrelator kein sinnvolles Ergebnis liefern. Hier zeigt sich dann der Vorteil einer redundanten Auswertemöglichkeit, wie sie mit der Frequenzanalyse zur Verfügung steht. Sollte zu einem Zeitpunkt überhaupt keine Messung möglich sein, kann wegen der vergleichsweise hohen Trägheit eines Eisenbahnfahrzeugs die Fahrzeugbewegung mithilfe des Systemmodells prädiziert werden.

2.5.3 Mögliche Erweiterungen

Mit dem hier vorgestellten Fusionskonzept werden nur Geschwindigkeitsmessungen in die Fusion einbezogen. Aus den gemessenen Geschwindigkeiten werden mithilfe des Kalman-Filters Position und Beschleunigung durch Integrieren bzw. Ableiten geschätzt. Weitere Sensoren, wie z. B. GPS oder Beschleunigungssensoren, können die Messungen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und Genauigkeit verbessern [4].

Des weiteren hat auch die Wahl des kinematischen Fahrzeugmodells einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtergebnis. In dieser Arbeit wurde ein Modell

mit konstanter Beschleunigung benutzt. Die Verwendung eines Modells reduzierter Ordnung, also mit der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit, kann das Ergebnis bei vergleichsweise trägen Systemen verbessern. Auch ein dynamisches Umschalten zwischen diesen Modellen mit einem *Interacting-Multiple-Model-Filter* (IMM) [5] ist denkbar. Diese Untersuchungen sollen allerdings nachfolgenden Arbeiten vorbehalten bleiben.

Die Nachteile einer nur relativen Positionsmessung und einer driftbehafteten Wegmessung können durch Synchronisation an Referenzpunkten gemildert werden. Zum einen wird die absolute Genauigkeit der Wegmessung wesentlich verbessert, zum anderen kann die absolute Position des Referenzpunktes zur Ortung verwendet werden. In Kapitel 3 wird die Möglichkeit beschrieben, durch eine Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen auch alleine mit dem Wirbelstrom-Sensorsystem direkt eine absolute Position angeben zu können, ohne hierfür weitere Sensorik zu benötigen. Diese Positionsmessung geht allerdings nicht in den hier zur Fusion der Geschwindigkeitsmessung verwendeten Kalman-Filter ein. Allerdings kann, wie in Kapitel 4 gezeigt wird, die Entfernungsmessung an den bekannten Positionen klassifizierter Weichen synchronisiert werden, so dass durch dieses Stützen der Wegmessung ein Driften der Messwerte wirkungsvoll vermieden wird.

3 Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen

In Kapitel 2 wurde die Geschwindigkeits- und Wegmessung mit Wirbelstrom-Sensoren beschrieben. Die mit dieser Messmethode gewonnene Positionsinformation ist stets eine relative Entfernung zwischen zwei Punkten. Zur Realisierung einer absoluten Positionsmessung müssen diese relativen Informationen daher mit einem Bezug zu Referenzpunkten versehen werden. Gängige Ortungssysteme verwenden hierzu eine satellitenbasierte Positionsmessung mit GPS, welche allerdings weder ausfallsicher ist, noch eine gleisselektive Ortung erlaubt. Somit werden zusätzliche Sensoren benötigt, welche Informationen aus Ortsmarkierungen, wie Ortsbaken oder Balisen, auslesen können, um eine absolute Positionsinformation zu erhalten. Hierfür müssen diese Markierungen an der Strecke installiert werden – je genauer die Wegmessung sein soll, desto mehr Referenzpunkte werden benötigt. Zur gleisselektiven Ortung müsste nach jeder Weiche für jede Fahrmöglichkeit jeweils eine Bake angebracht werden, um Fahrwege eindeutig zuzuordnen zu können.

Um eine absolute Ortsangabe zu erhalten, würde es prinzipiell genügen, Ereignisse zu detektieren und einfach zu zählen [44]. Die Weginkremente ergeben aufaddiert die zurückgelegte Entfernung des Fahrzeugs. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass sich die Anzahl der zu zählenden Ereignisse in einem bestimmten Streckenabschnitt nicht mit der Zeit ändert. Lose metallische Gegenstände können mitunter ungewollt detektiert werden. Zur Vermeidung von Fehlmessungen empfiehlt es sich dabei, einzelne charakteristische Ereignisse zu klassifizieren und – analog zum Auslesen der Kennung einer Balise oder Ortsbake – einer bestimmten Position zuzuordnen.

Die Wirbelstrom-Sensorik bietet die Möglichkeit, zusätzlich zur Geschwindigkeitsmessung die Sensorsignale nach bekannten Signalmustern zu durchsuchen und diese zu klassifizieren. Mithilfe der Eigenschaft, dass die Signalmuster bei einem bestimmten Ereignis sich mit der Zeit nicht verändern, können Signalausschnitte von bestimmten Referenzpunkten abgespeichert und anschließend immer wieder ausgewertet werden. Sehr gut zur Mustererkennung geeignet sind die Signale von Eisenbahnweichen; zum einen sind diese aufgrund ihrer Charakteristik eindeutig im Sensorsignal zu detektieren, zum anderen erfolgt die zur gleisselekti-

ven Ortung benötigte Richtungsentscheidung stets an einer solchen Weiche. Ohne zusätzliche Einbauten kann somit ein Zug absolut und gleisgenau geortet werden. Im folgenden Kapitel werden zunächst einige spezielle Eigenschaften der Wirbelstrom-Sensorsignale beim Befahren von Eisenbahnweichen anhand von Beispielen charakterisiert, wobei kurz auf die notwendigen Signalverarbeitungsschritte eingegangen wird. Die Weichenerkennung gliedert sich in Detektion und Klassifikation, wobei insbesondere methodische Ähnlichkeiten mit der automatischen Sprachverarbeitung deutlich werden. Für die Klassifikation wird neben verschiedenen Verfahren zum Mustervergleich auch die statistische Bewertung mittels eines Bayes-Klassifikators betrachtet. Abschließend wird anhand von Beispielmessungen die Eignung dieses Konzepts aufgezeigt.

3.1 Bauteile einer Eisenbahnweiche

Wie bereits in Abschnitt 2.4 dargelegt, sind die Eigenschaften der Sensorsignale abhängig von den Komponenten im Gleisbereich, die der Sensor passiert. Daher kann z. B. das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein einer Eisenbahnweiche detektiert werden. Die Stellung der Weiche ergibt sich dabei aus der Abfolge der verschiedenen Ereignisse [26, 27].

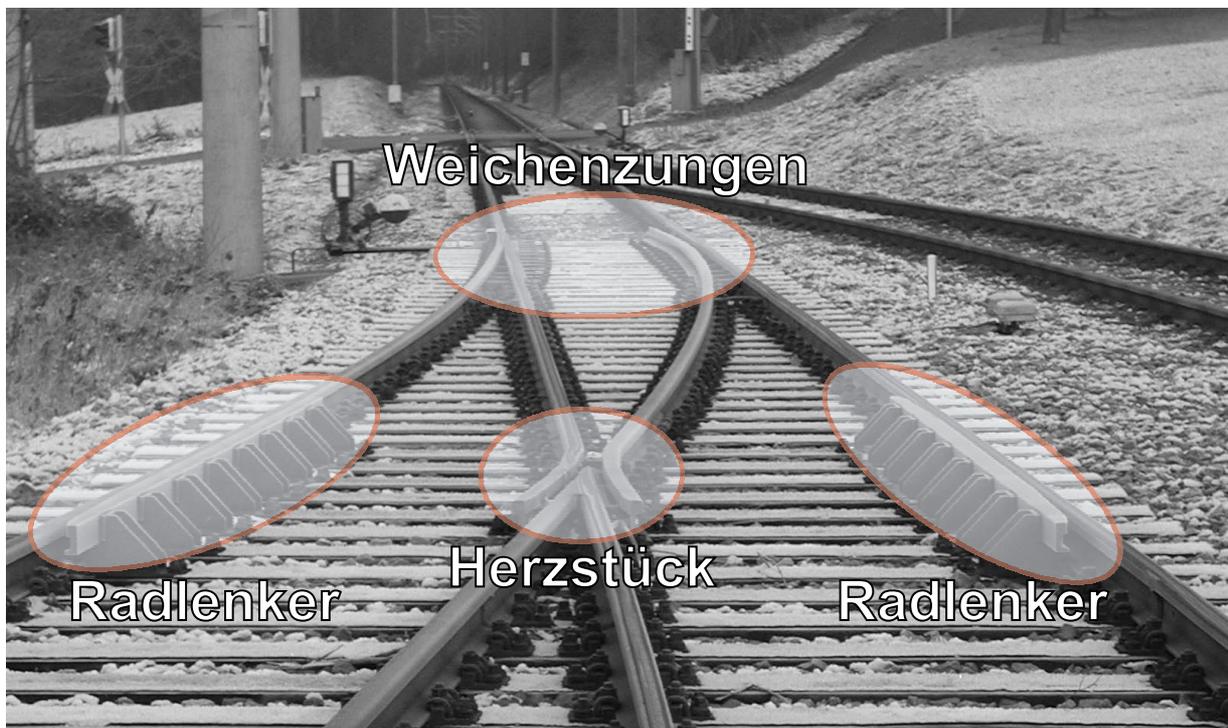


Abbildung 3.1: Eisenbahnweiche mit den Bauteilen Radlenker, Herzstück und Weichenzungen.

Abbildung 3.1 zeigt eine typische Eisenbahnweiche, deren einzelne Bauteile sich deutlich von den übrigen Bauteilen am Gleis abheben. Je nach Weichenstellung werden dabei unterschiedliche Bauteile passiert – anliegende¹ oder abliegende² Weichenzunge bzw. Herzstück oder Radlenker. Dies ist auch in den daraus resultierenden Wirbelstrom-Sensorsignalen gut zu erkennen. Beispiele derartiger Sensorsignale sind in den Abb. 3.2 und 3.3 dargestellt. Der Sensor wurde bei der Messung über der rechten Schiene in Fahrtrichtung angebracht. In Abb. 3.2 wird eine Weiche spitz nach links befahren (in diesem Fall das Stammgleis), der Sensor passiert somit zunächst eine anliegende Weichenzunge und anschließend das Herzstück der Weiche. Das resultierende Sensorsignal zeigt insbesondere am Beginn und Ende der Weichenzunge und im Bereich des Herzstücks hohe Amplituden, so dass die Bereiche der Bauteile entsprechend abgrenzbar sind. Diese Ereignisse und deren Reihenfolge lassen einen eindeutigen Rückschluss auf die Weichenstellung (links/rechts – hier rechts) und die befahrene Richtung (spitz/stumpf³ – hier spitz) zu. Zwischen Stamm- und Zweiggleis kann allein anhand der Sensorsignale jedoch nicht zweifelsfrei unterschieden werden, da die Typen der passierten Bauteile identisch wären und mit dem Wirbelstrom-Sensor ohne weitere Vorabinformation aus der digitalen Karte keine zweidimensionalen geometrischen Daten gemessen werden können.

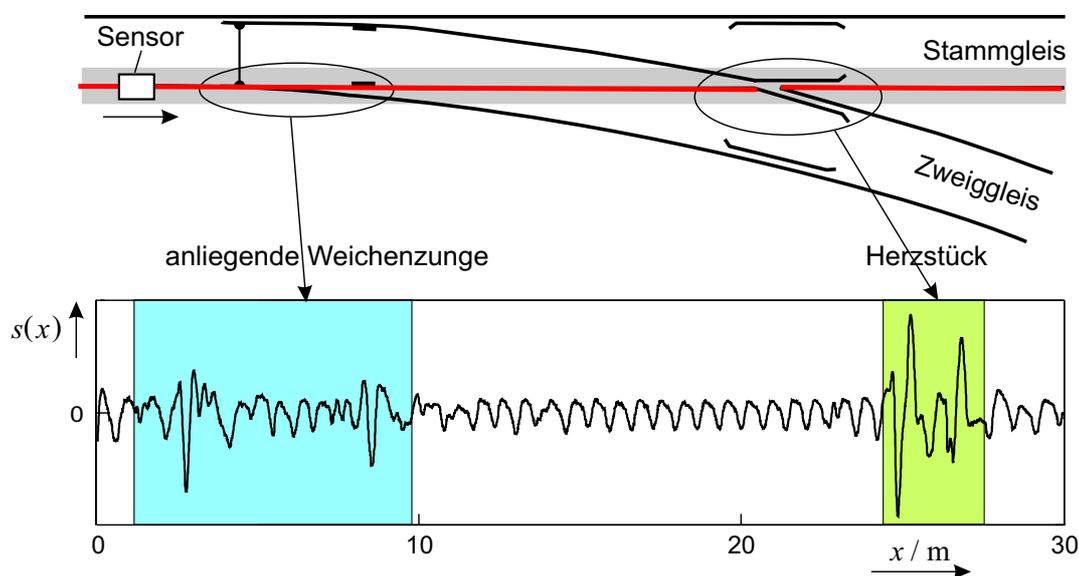


Abbildung 3.2: Sensorsignal $s(x)$ beim Befahren einer Weiche spitz nach links.

¹Die *anliegende* Weichenzunge wird vom Stellmechanismus an die außen liegende Backenschiene angepresst und liegt an dieser fest an.

²Die *abliegende* Weichenzunge wird vom Stellmechanismus von der außen liegenden Backenschiene auf Abstand gehalten, damit der Spurkranz nicht an der Zunge aufläuft.

³Eine Weiche wird spitz befahren, wenn man sich ihr von der Seite der Weichenzungen her nähert, und stumpf befahren, wenn man sich ihr von der Seite des Herzstücks her nähert.

In Abb. 3.3 ist die selbe Weiche nach rechts gestellt und der Sensor passiert somit die abliegende Weichenzunge gefolgt vom Radlenker der Weiche. Diese Abfolge der Ereignisse ergibt, dass die Weiche spitz nach rechts befahren wurde.

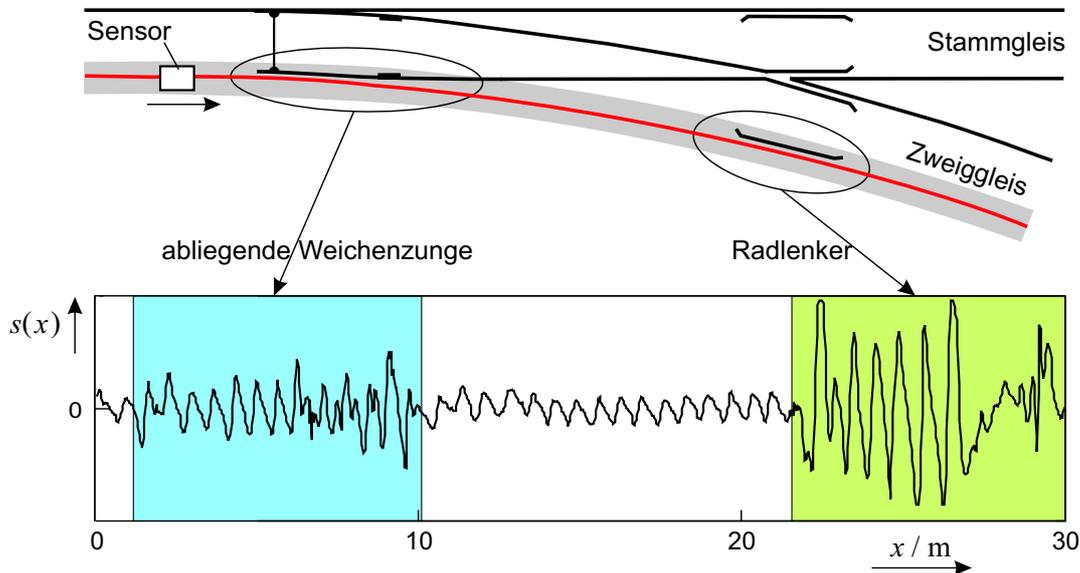


Abbildung 3.3: Sensorsignal $s(x)$ beim Befahren einer Weiche spitz nach rechts.

Auch in Abb. 3.3 ist deutlich zu erkennen, dass nicht nur die Weiche als ein Ereignis detektiert werden kann, sondern dass das Wirbelstrom-Sensorsignal außerdem einen Rückschluss auf die Stellung der jeweiligen Weiche erlaubt. Somit kann der Fahrweg durch eine Weichenstraße⁴ mithilfe der Weichenerkennung gleisgenau nachvollzogen werden.

3.2 Weichenerkennung

Die Weichenerkennung als Teil des Ortungssystems hat die Aufgabe, nach dem Überfahren einer Weiche dieselbe zu detektieren und identifizieren. Danach soll eine eindeutige Weichenkennung (Weichen-ID) und die Weichenstellung zur weiteren Verarbeitung an das Ortungssystem übermittelt werden. Diese Problemstellung ähnelt der der automatischen Spracherkennung, wo ebenfalls Muster detektiert und anhand von Referenzdaten wiedererkannt werden sollen. Im folgenden wird daher zunächst auf die Analogien zwischen der Weichenerkennung und der Sprachsignalverarbeitung eingegangen, bevor dann ein Konzept zur Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen vorgestellt wird.

⁴Eine Weichenstraße bezeichnet mehrere hintereinanderliegende Weichen, z. B. in Ein- und Ausfahrbereichen von Bahnhöfen.

3.2.1 Analogien zur Sprachsignalverarbeitung

Im Bereich der digitalen Sprachverarbeitung steht oftmals die automatische Spracherkennung im Vordergrund. Dabei ergeben sich viele zur Weichenerkennung ähnlich gelagerte Anforderungen und Aufgaben. Zunächst müssen in einem kontinuierlichen Datenstrom Ereignisse – hier Wörter bzw. Phoneme – detektiert und extrahiert werden. Dies geschieht normalerweise mittels einer Messung der mittleren Signalleistung

$$P_{\mathbf{s}(t)} = \frac{1}{T_M} \int_{t - \frac{T_M}{2}}^{t + \frac{T_M}{2}} s^2(\tau) d\tau, \quad (3.1)$$

die in einem Intervall der Dauer T_M enthalten ist. Die Sprechpausen zwischen den einzelnen Wörtern haben eine sehr geringe Leistung, wohingegen die gesprochenen Wörter selbst eine hohe Signalleistung verursachen. Somit können Wörter voneinander getrennt aus dem kontinuierlichen Signal extrahiert werden, sofern der Sprecher ausreichend lange Pausen zwischen den Wörtern macht.

Diese Wörter müssen dann anschließend klassifiziert werden, was üblicherweise durch einen Mustervergleich mit einem oder mehreren Referenzmustern erfolgt. Allerdings spielen bei diesem Vergleich die unterschiedlichen Tonhöhen und Sprechgeschwindigkeiten der Sprecher eine wichtige Rolle. Damit ein Spracherkennungssystem universell funktioniert, müssen diese Einflüsse vor einem Vergleich entsprechend beseitigt werden. Hierzu bedient man sich unterschiedlichster Verfahren, z. B. der Fourier-Transformation oder der darauf aufbauenden Cepstrum-Analyse [59], welche mit einem logarithmierten Spektrum arbeitet.

Schließlich kann der Mustervergleich mit einer modellgestützten Klassifikation ergänzt werden. In diese Modelle geht z. B. Vorwissen über bestimmte Zusammenhänge bei gesprochener Sprache ein, welches die Segmentierung der Signale in bedeutungstragende Einheiten ermöglicht [19]. Die Verwendung solcher Modelle zur Verbesserung der Klassifikation von Eisenbahnweichen ist in Kapitel 4 beschrieben. Im folgenden wird ein aus der Sprachsignalverarbeitung abgeleitetes Konzept zur Weichenerkennung aus den Wirbelstrom-Sensordaten erläutert.

3.2.2 Konzept zur Merkmalsgewinnung

Eine Eisenbahnweiche lässt sich, wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, anhand der einzelnen Bauteile detektieren und klassifizieren. Eine Strategie zur Detektion und

Klassifizierung der Bauteile ist in Abb. 3.4 skizziert. Dabei können sowohl Weichen als ein zusammenhängendes Ereignis als auch einzelne Bauteile detektiert und klassifiziert werden. Werden einzelne Bauteile detektiert, so ist anhand der Abfolge dieser Bauteile ein Rückschluss auf die Stellung und Richtung der befahrenen Weiche möglich. Die gewonnene Information kann dann z. B. mit gespeicherten Daten aus einem digitalen Streckenatlas (siehe Abschnitt 4.1) verglichen werden.

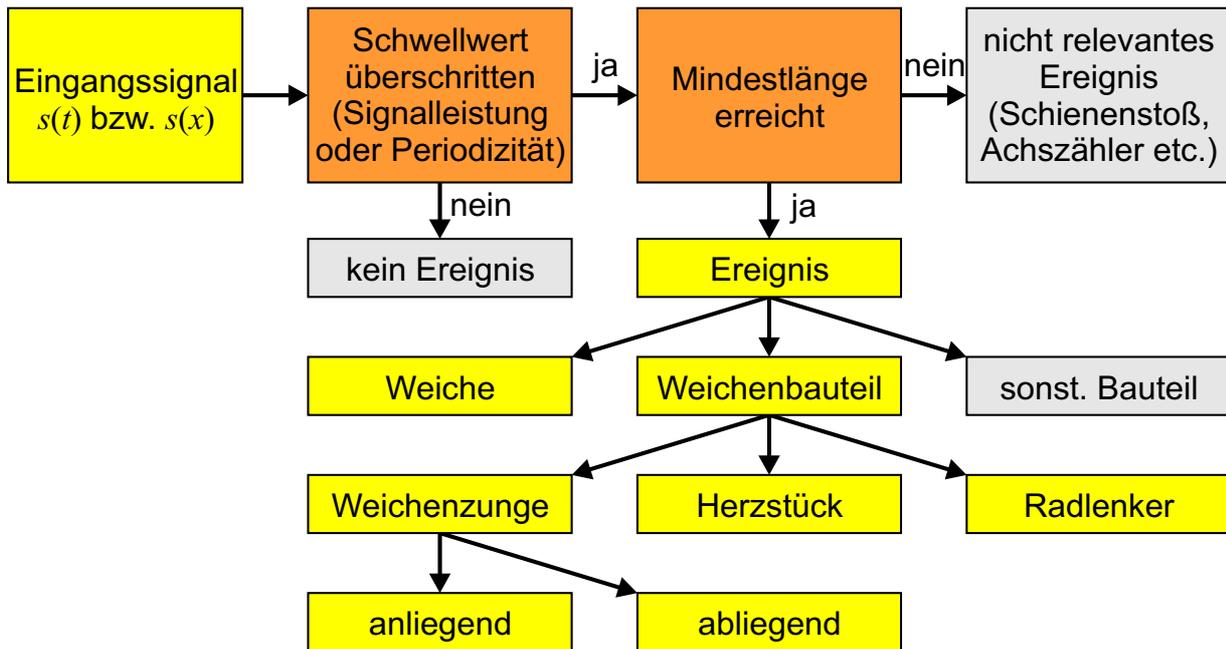


Abbildung 3.4: Strategie zur Klassifizierung einer Eisenbahnweiche anhand ihrer Bauteile.

Bei mehreren aufeinander folgenden Messfahrten wurde die in Abb. 3.5 schematisch dargestellte Strecke im Bahnhof Bad Herrenalb mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren. Da in diesem Fall der Sensor links über der Schiene montiert war, wurden folgende Bauteile passiert:

- Weiche 1090303 stumpf von links
(Ereignisse Herzstück + anliegende Weichenzunge)
- Weiche 1090202 stumpf von rechts
(Ereignisse Radlenker + abliegende Weichenzunge)
- Weiche 1090103 stumpf von links
(Ereignisse Herzstück + anliegende Weichenzunge)

Die bei dieser Messung passierten Weichenbauteile sind ebenfalls in Abb. 3.5 dargestellt.

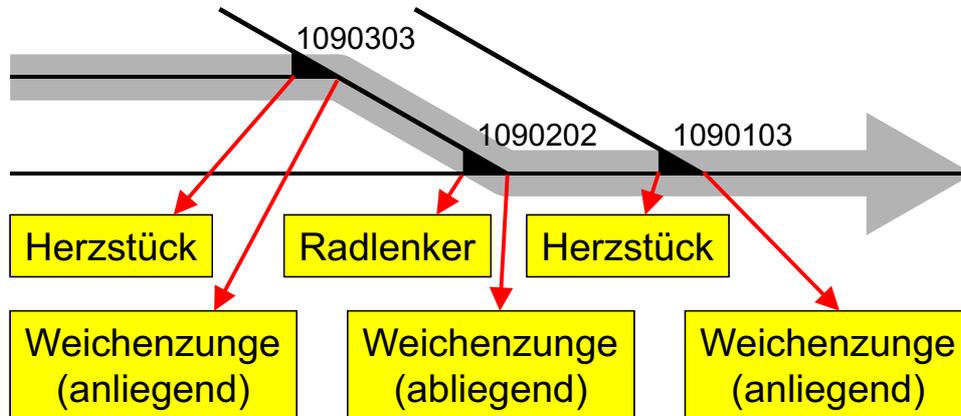


Abbildung 3.5: Bei der Messfahrt befahrene Strecke im Bahnhof Bad Herrenalb.

Ein Beispiel für die an dieser Stelle auftretenden Signale des Wirbelstrom-Sensors ist in Abb. 3.6 zu sehen. Man kann im Signalverlauf deutlich die einzelnen Weichen und Bauteile voneinander trennen. Allerdings ist der Abstand zwischen der Weichenzunge der Weiche 1090202 und des Herzstücks der Weiche 1090103 offensichtlich zu gering, um diese beiden Bauteile sicher voneinander trennen zu können.

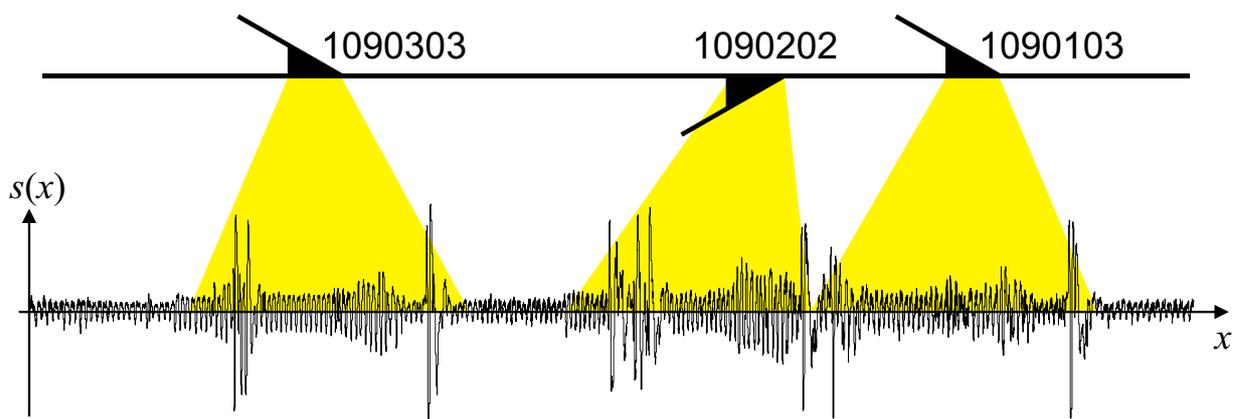


Abbildung 3.6: Sensorsignal der in Abb. 3.5 skizzierten Infrastruktur.

Der Ablauf der Weichenerkennung ist in Abb. 3.7 skizziert. Das kontinuierliche Sensorsignal $s(t)$ wird ggf. zunächst in ein Ortssignal $s(x)$ umgewandelt. Die blockweise Detektion liefert ein zusammenhängendes Signalmuster s_i^* des i -ten Ereignisses, welches zunächst normalisiert wird. Aus dem normalisierten Signal s_i müssen dann geeignete Merkmale extrahiert werden, z. B. der jeweilige

Abstand $D_{ik}=D_{sr}$ zu Referenzmustern r_k . Die anschließende Klassifikation soll dann das extrahierte Signalmuster einer vorgegebenen Klasse k zuordnen. Dabei bezeichnet $P(k|s)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das Signalmuster zu eben dieser Klasse gehört.



Abbildung 3.7: Flussdiagramm zur Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen.

Die wichtigsten Verarbeitungsschritte bei der Weichenerkennung sind die Detektion, welche in Abschnitt 3.3 beschrieben ist, sowie die anschließende Merkmalsextraktion und Klassifikation, welche in Abschnitt 3.4 erläutert wird.

3.3 Detektion von Eisenbahnweichen

In diesem Abschnitt wird die grundlegende Vorgehensweise bei der Detektion von Eisenbahnweichen mit einem Wirbelstrom-Sensorsystem erläutert; weitergehende Details sind in [27] beschrieben. Zunächst müssen die Wirbelstrom-Signale – analog zur automatischen Verarbeitung von Sprachsignalen – entsprechend vorverarbeitet werden. Die eigentliche Detektion erfolgt anschließend über eine Leistungsmessung, welche adaptiv an charakteristische Frequenzen angepasst werden kann. Das vorgestellte Verfahren erlaubt wahlweise die Detektion ganzer Weichen oder einzelner Bauteile. Die am Ende dieses Abschnitts exemplarisch aufgeführten Messergebnisse zeigen, dass diese Vorgehensweise auch unter realen Bedingungen gut funktioniert und alle relevanten Ereignisse im Fahrweg zuverlässig detektiert werden können.

3.3.1 Signalverarbeitung

Um zwischen Weichenbereich⁵ und freier Strecke unterscheiden zu können, ist vor allem das Merkmal der Signalleistung gemäß Gl. (3.1) geeignet. Damit kann

⁵Der Begriff Weichenbereich bezeichnet in dieser Arbeit den Abschnitt des Gleises, welcher baulich einer Eisenbahnweiche zuzuordnen ist. Dieser erstreckt sich normalerweise vom Schienenstoß vor der Zungenspitze bis zum Schienenstoß nach dem Radlenker bzw. Herzstück.

eine Unterscheidung zwischen den häufig vorkommenden Schienenbefestigungen einerseits und speziellen Ereignissen, wie z. B. Weichenbauteilen andererseits getroffen werden. Generell ist bei Fahrt auf der freien Strecke fast nur ein periodischer Signalanteil zu erkennen; im Weichenbereich überwiegt hingegen der aperiodische Anteil, wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erläutert. Die Periodizität ist damit ein weiteres mögliches Unterscheidungsmerkmal. Zur Verdeutlichung ist der Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho_{12}(v\tau)$ für typische Sensorsignale in Abb. 3.8 bei Messungen auf freier Strecke bzw. im Weichenbereich wiedergegeben.

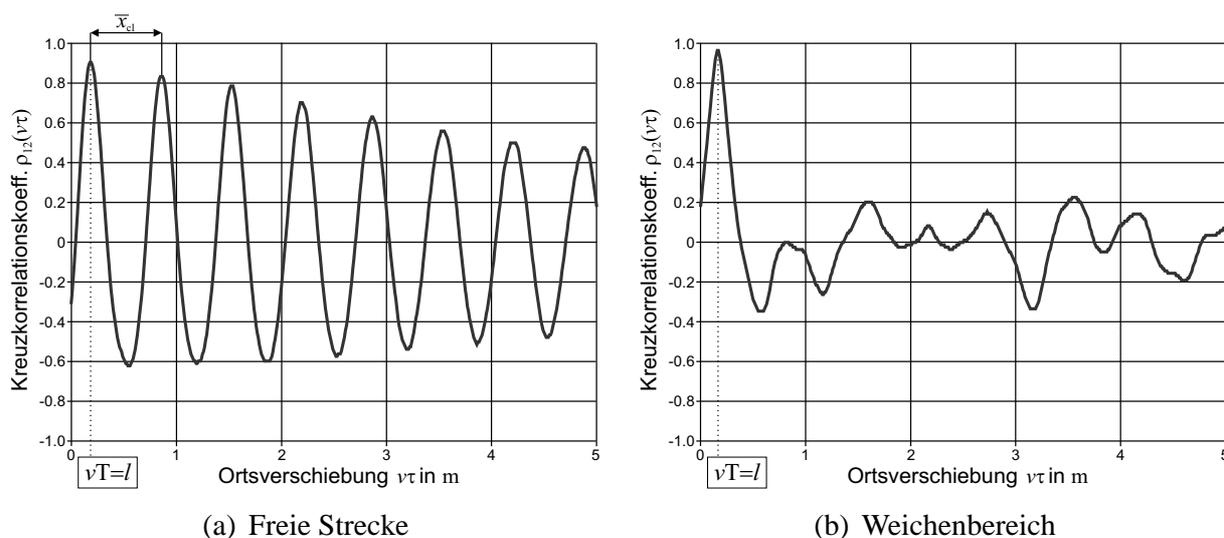


Abbildung 3.8: Gemessener Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho_{12}(v\tau)$.

Da der Sensor auf freier Strecke vornehmlich die periodisch auftretenden Schienenbefestigungen detektiert, ist die Kreuzkorrelationsfunktion ebenfalls periodisch. Der mittlere Abstand \bar{x}_{cl} zwischen zwei benachbarten Schienenbefestigungen ergibt sich aus dem periodischen Anteil von $\rho_{12}(v\tau)$, wie in Abb. 3.8(a) gezeigt. Im Gegensatz dazu wird beim Befahren einer Eisenbahnweiche das Sensorsignal von vielen individuellen Komponenten, wie Weichenzungen oder Herzstücken, beeinflusst. Daher ist die in Abb. 3.8(b) dargestellte resultierende Kreuzkorrelationsfunktion nichtperiodisch.

Zur Weichendetektion muss das kontinuierliche Sensorsignal zunächst nach relevanten Ereignissen durchsucht werden. Hierzu wird das Signal mittels eines Bandpassfilters in zwei Teile aufgeteilt: Ein Teil besteht aus den Signalanteilen, die von den Schienenbefestigungen⁶ herrühren, der andere Teil von den übrigen Bauteilen. Da die Schienenbefestigungen stets periodisch auftreten, erscheinen

⁶Obwohl es unterschiedliche Bauarten von Befestigungen gibt, sind die im folgenden beschriebenen Schritte der Signalverarbeitung – von seltenen Sonderbauformen einmal abgesehen – immer die gleichen.

sie im periodischen Signalanteil mit ihrer charakteristischen Frequenz f_{cl} , welche insbesondere bei maschinell verlegten Gleisen recht genau bei $\frac{1}{0,6 \text{ m}}$ liegt. Der genaue Wert kann nach entsprechender Vermessung als Parameter in einer digitalen Streckenkarte gespeichert werden.

Der für die spätere Klassifikation wesentlich interessantere Teil des Signals wird von den übrigen metallischen Bauteilen an der Schiene hervorgerufen. Dies können z. B. im Bereich einer Weiche die Weichenzungen, das Herzstück und die Radlenker sein. Charakteristisch für die Weichenbauteile ist die wesentlich höhere resultierende Leistung im Sensorsignal bei der Überfahrt. Das liegt u. a. an der geringeren Entfernung von einzelnen Bauteilen zum Sensor, da sie über die Bauhöhe der Schienenbefestigungen herausragen. Dies ist insbesondere bei den Radlenkern der Fall, welche in Abb. 3.1 links und rechts vorne zu erkennen sind. Alle diese Bauteile, welche noch näher zu klassifizieren sind, sind im nichtperiodischen Signalanteil enthalten. Der nichtperiodische Anteil ist dabei der Anteil, der nicht innerhalb eines schmalen Frequenzbands um f_{cl} liegt.

Mithilfe der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit wird zunächst das geschwindigkeitsabhängige Zeitsignal des Wirbelstrom-Sensors in ein von der Geschwindigkeit unabhängiges Ortssignal umgewandelt. Abbildung 3.9 zeigt ein solches Ortssignal beim Befahren einer Eisenbahnweiche spitz nach rechts. In diesem Fall passiert der Sensor zunächst die Weichenzunge und anschließend das Herzstück der Weiche.

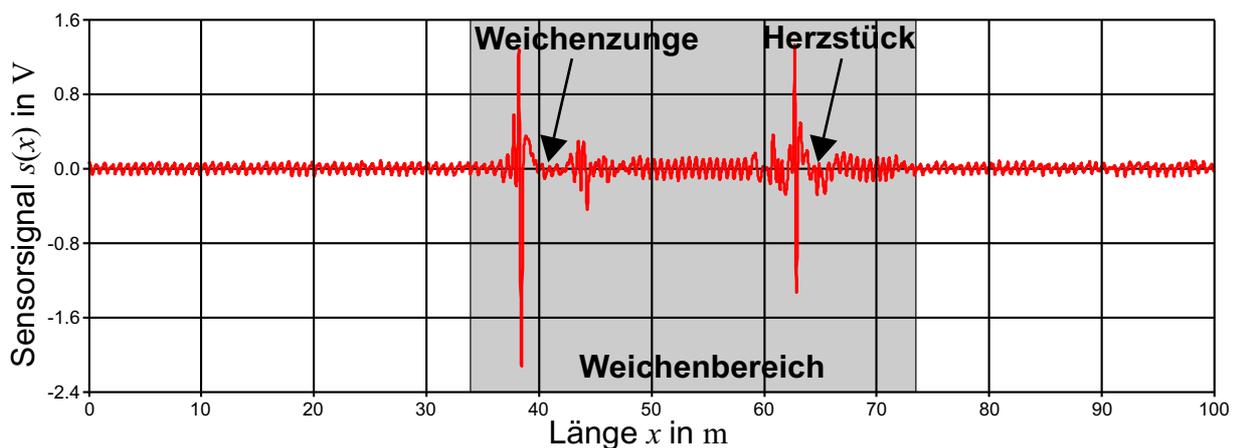


Abbildung 3.9: Sensorsignal beim Passieren einer Weiche.

Im Weichenbereich überwiegen die nichtperiodischen Signalanteile, hervorgerufen durch typische Bauteile, wie Weichenzungen oder Radlenker, gegenüber den periodischen. Somit kann eine Weichendetektion durch Analyse der im Signal vorhandenen Frequenzen realisiert werden. Abbildung 3.10 zeigt den Leistungsverlauf beim Befahren einer Eisenbahnweiche, aufgeteilt in die gesamte Leistung

$P_{ov}(x)$ des Nutzsignals und die Leistung $P_{cl}(x)$ im Frequenzband der Schienenbefestigungen. Die Blockgröße, d. h. die Länge des zur Messung der Signalleistung verwendeten Ausschnitts, sollte dabei den Abstand der Schienenbefestigungen x_{cl} nicht unterschreiten, da dann die Ergebnisse nicht mehr aussagekräftig sind. In dem unten gezeigten Beispiel wurde bewusst eine sehr große Blockgröße gewählt, um eine gute Auflösung im Frequenzbereich zu erzielen. Ein möglicher Schwellwert zur Detektion der Weiche ist ebenfalls eingezeichnet.

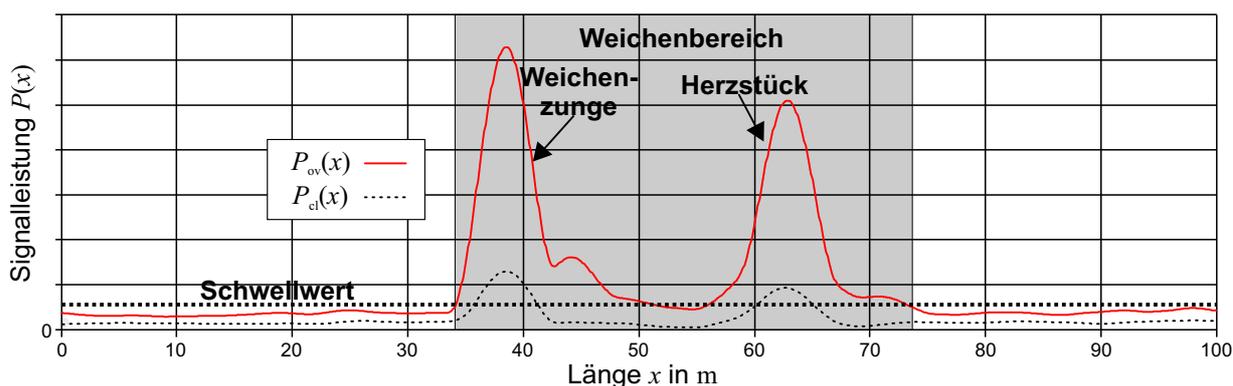


Abbildung 3.10: Verlauf der Gesamtleistung $P_{ov}(x)$ und des periodischen Teils $P_{cl}(x)$ des gemessenen Wirbelstrom-Sensorsignals aus Abb. 3.9.

Man erkennt anhand dieses Beispiels, dass Weichen mitunter in zwei Ereignisse zerfallen würden, sofern nur die Über- bzw. Unterschreitung des Schwellwertes der Gesamtleistung betrachtet wird. Wie in Abschnitt 3.4 gezeigt wird, ist es allerdings wünschenswert, alle Weichen als jeweils ein zusammenhängendes Ereignis zu detektieren. Es bestehen grundsätzlich vier Möglichkeiten, diese Forderung zu erfüllen: Die genaue Anpassung der Schwellwerte, eine Hysterese zwischen den Schwellwerten von Ereignisstart und -ende, die selektive Leistungsmessung in charakteristischen Frequenzbändern und die gleitende Mittelung der gemessenen Leistungswerte.

3.3.1.1 Genaue Anpassung des Detektionsschwellwertes

Im Weichenbereich werden in der Regel Holzschwellen verwendet, deren Schienenbefestigungen oftmals aus einer größeren Anzahl von Bauteilen bestehen als die Befestigungen bei den auch auf der Strecke der *Albtalbahn* zumeist verwendeten Betonschwellen. Somit ergibt sich eine – wenn auch nur geringfügig – höhere Signalleistung im gesamten Weichenbereich.

Zur Realisierung einer erfolgreichen Detektion kann der Schwellwert der Signalleistung zwischen Ereignis und Nichtereignis bei guter Kenntnis der Infrastruktur

sehr genau an dieselbe angepasst werden. Fehlt dieses Vorabwissen oder ergeben sich geringe Änderungen an der Infrastruktur wird die Detektion nicht mehr zuverlässig funktionieren, da entweder bei einem zu hohen Schwellwert wichtige Bauteile nicht detektiert oder bei einem zu niedrigen eine Unzahl an nicht relevanten Signalanteilen extrahiert würde.

3.3.1.2 Schwellwerthysterese

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, ist die Signalleistung der Schienenbefestigungen im Weichenbereich in der Regel geringfügig höher als auf der freien Strecke, somit auch zwischen den einzelnen Weichenbauteilen. Der Schwellwert zum Einleiten eines Ereignisses (*Attack*-Schwellwert) kann sich von dem zum Beenden eines Ereignisses (*Release*-Schwellwert) unterscheiden.

Wird der *Attack*-Schwellwert größer gewählt als der *Release*-Schwellwert entspricht dies einer Hysterese. Dies führt zu mehr zusammenhängend detektierten Ereignissen, da einmal begonnene Ereignisse erst bei einem niedrigeren Schwellwert beendet werden, hingegen kleinere Bauteile, welche gänzlich keine große Signalleistung hervorrufen, unberücksichtigt bleiben.

Auch bei diesem Verfahren wird die Weiche in zwei Bauteile zerfallen, wenn sich die Signalleistung der Schienenbefestigungen im Weichenbereich nicht von der auf der freien Strecke unterscheidet.

3.3.1.3 Frequenzselektive Leistungsmessung

Im Gegensatz zur Gesamtleistung $P_{ov}(x)$, welche im Weichenbereich beim Passieren der Weichenbauteile stark ansteigt, sinkt die Leistung $P_{cl}(x)$ im Frequenzbereich der Schienenbefestigungen zwischen den Bauteilen Weichenzunge und Herzstück ab, sofern der Abstand der Schienenbefestigungen im Weichenbereich nicht mit dem Abstand \bar{x}_{cl} auf der freien Strecke übereinstimmt. In diesem Fall lässt sich die Weiche recht einfach als ein einziges Ereignis detektieren, indem nur der Leistungsanteil betrachtet wird, der nicht von den Schienenbefestigungen herrührt. Dieser entspricht genau der Differenz von $P_{ov}(x)$ und $P_{cl}(x)$.

Noch deutlicher wird die unterschiedliche Charakteristik der Signale auf freier Strecke und im Weichenbereich bei der Betrachtung des Verhältnisses von Gesamtleistung und der Leistung der Schienenbefestigungen, repräsentiert durch die Irregularität

$$c(x) = \frac{P_{ov}(x) - P_{cl}(x)}{P_{cl}(x)} = \frac{P_{ov}(x)}{P_{cl}(x)} - 1. \quad (3.2)$$

Auf freier Strecke ist der Wert der Irregularität im Idealfall genau null, hingegen im Weichenbereich wesentlich größer als eins. Der in Abb. 3.11 dargestellte Verlauf erlaubt eine noch deutlichere Abgrenzung zwischen den Bereichen.

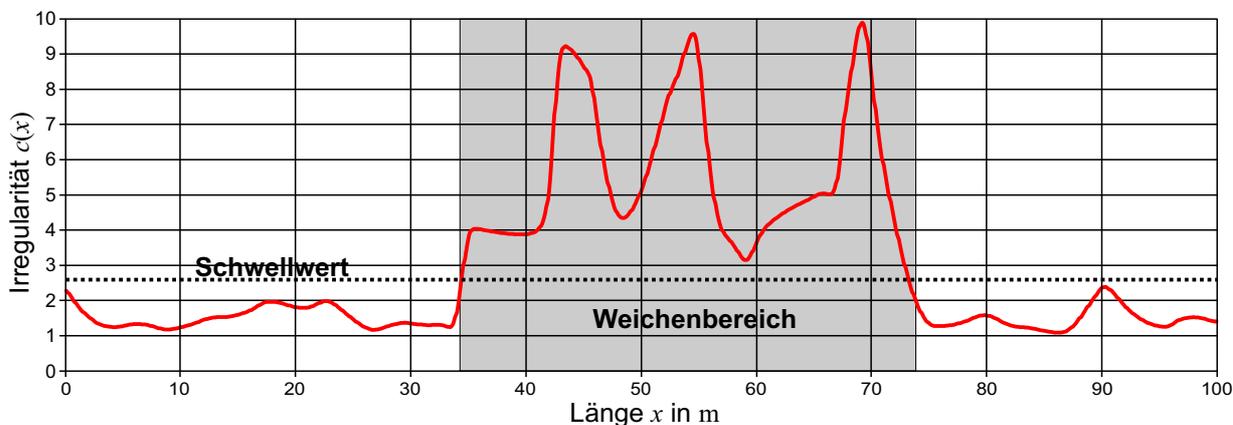


Abbildung 3.11: Verlauf der Irregularität $c(x)$ bei der Weichenfahrt.

Eine Detektion der Weiche als ein komplettes Bauteil erfordert eine genaue Kenntnis über den mittleren Abstand \bar{x}_{cl} der Schienenbefestigungen und ist daher ohne jegliche Kenntnis über die vorhandene Infrastruktur nicht als robust anzusehen. Sollte außerdem der Schwellenabstand exakt der gleiche sein wie auf der freien Strecke, so können auch bei diesem Verfahren nur die einzelnen Weichenbauteile individuell detektiert und bei der Klassifikation dann der entsprechenden Weiche zugeordnet werden. Im Zeitsignal ändert sich die charakteristische Frequenz f_0 linear mit der Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t)$ entsprechend

$$f_0 = v(t) \cdot f_{cl} = \frac{v(t)}{\bar{x}_{cl}}. \quad (3.3)$$

Die Detektion kann aber wie auch im Ortssignal mit einer Leistungsmessung erfolgen. Gegebenenfalls kann durch Unterdrückung von f_{cl} bei bekannter Geschwindigkeit $v(t)$ und bekanntem Schwellenabstand \bar{x}_{cl} ein ähnliches Ergebnis erreicht werden. Sofern keine genaue Geschwindigkeitsinformation verfügbar ist, ist eine Ausblendung der Schienenbefestigungen hingegen nicht möglich.

3.3.1.4 Remanenz durch gleitende Mittelung

Zwischen zwei zusammengehörenden Weichenbauteilen kann ggf. ein Abschnitt mit niedrigerer Leistung liegen, so dass der Zusammenhang zwischen den Bauteilen in diesem Fall verloren geht. Ein Haltefaktor r erlaubt aufgrund der gleitenden

Mittelung das langsamere Abklingen der gemessenen Leistung

$$P = \begin{cases} r \cdot P_{t-1} + (1 - r) \cdot P_t & , \text{ falls } P_t < P_{t-1} \\ P_t & , \text{ sonst} \end{cases} \quad (3.4)$$

über mehrere Blöcke bzw. Zeitschritte t hinweg, so dass Abschnitte mit geringerer Leistung an das zuerst detektierte Signal angehängt werden. Je nach Einstellung dieses Haltefaktors werden unterschiedlich lange Distanzen mit geringerer Leistung zwischen einzelnen Ereignissen überbrückt. Damit kann die Detektion zusammenhängende Ereignisse liefern, ohne auf eine genaue Erfassung des Beginns eines Ereignisses verzichten zu müssen. Allerdings können dann mehrere direkt aufeinander folgende Weichen in ein Ereignis zusammenfallen.

Dieses Verfahren funktioniert auch ohne eine genaue Geschwindigkeitsinformation. Es können Weichen somit direkt im Zeitsignal detektiert werden. Dies ist insbesondere bei Ausfall eines Sensorkanals wichtig; bei der folgenden Klassifikation sind dann allerdings Verfahren anzuwenden, die gegenüber Geschwindigkeitsänderungen unempfindlich sind. Als besonders geeignet hat sich der Mustervergleich mit der Dynamischen Zeitverzerrung (Abschnitt 3.4.6) gezeigt, mit dem die in Abschnitt 3.4.10 dargestellten Ergebnisse erzielt wurden. Zur Überprüfung dieser Klassifikationsverfahren wurden bei der automatisierten Detektion die Weichen stets mit dem zuletzt vorgestellten Detektionsverfahren extrahiert.

3.3.2 Messergebnisse

Die im folgenden zusammengefassten Ergebnisse wurden bei Messfahrten auf der *Albtalbahn* zwischen Bad Herrenalb und Busenbach bei der in Abb. 3.12 topologisch skizzierten Ausfahrt aus dem Bahnhof Bad Herrenalb gewonnen.

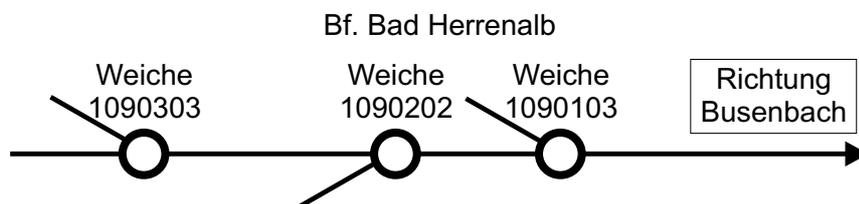


Abbildung 3.12: Gleistopologie im Bahnhof Bad Herrenalb.

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Parameter auf die Detektion zusammenfassend erläutert. Abbildung 3.13 zeigt das Detektionsergebnis bei der Ausfahrt aus dem Bahnhof Bad Herrenalb. Man erkennt, dass die Weichen 1090202 und 1090103 nicht voneinander getrennt werden können, da sie direkt aufeinander folgen. Für die weitere Auswertung wurden

die Signalmuster dieser Weichen daher manuell nachbearbeitet. Bei einer vollkommen automatisierten Auswertung können diese Weichen dann als Weichengruppe erfasst und bearbeitet werden.

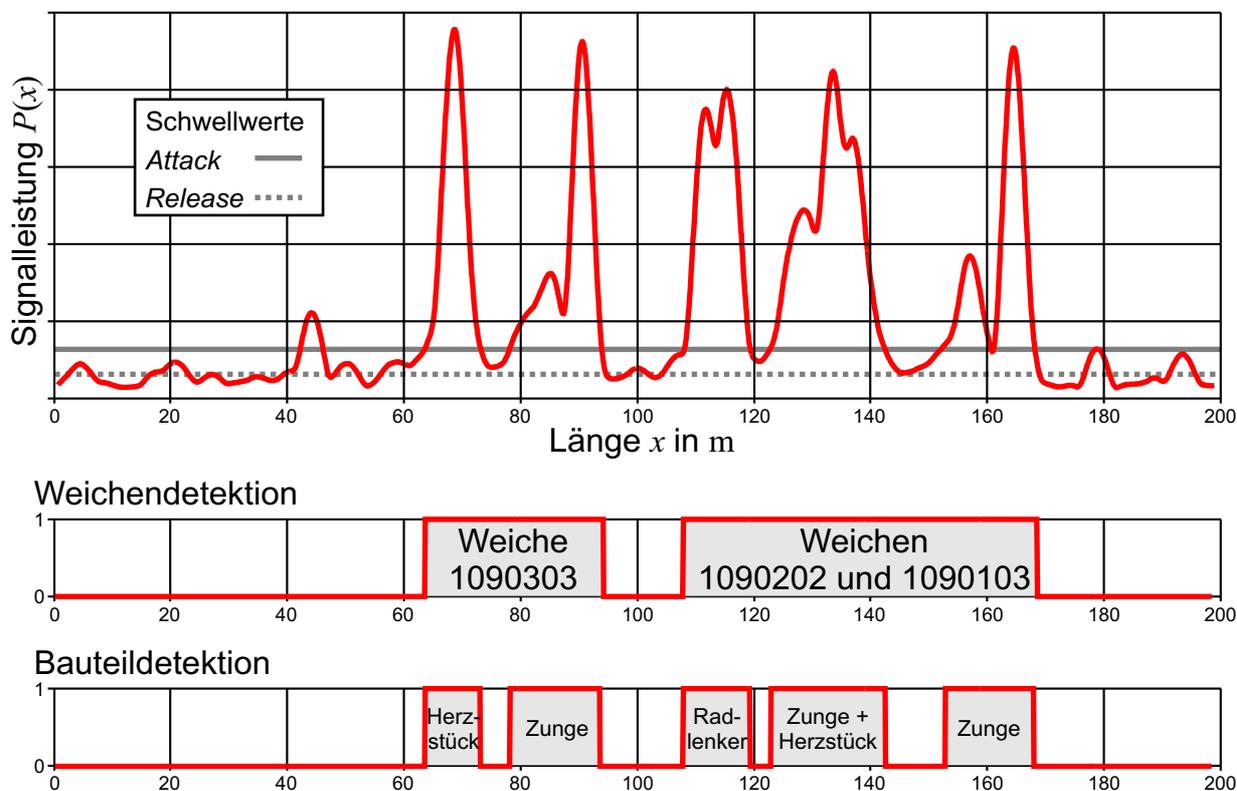


Abbildung 3.13: Im Bahnhof Bad Herrenalb detektierte Ereignisse.

Der Einfluss der Schwellwerte auf die Art der Detektion ist ebenfalls in Abb. 3.13 zu sehen. Nach einer entsprechenden Anpassung mit identischen Schwellwerten für *Attack* und *Release* werden nun nicht mehr die Weichen als ein Ganzes, sondern die einzelnen Bauteile jeweils getrennt detektiert. Dies liegt an dem ausreichend großen Abstand zwischen Weichenzunge und Herzstück bzw. Radlenker einer Weiche. Allerdings fallen auch hier die Weichenzunge der Weiche 1090202 und das Herzstück der Weiche 1090103 in ein Ereignis zusammen, können also nur als Gruppe detektiert und klassifiziert werden.

3.3.3 Fazit

- Die Detektion kann sowohl im Orts- als auch im Zeitsignal durchgeführt werden. Die Detektion im Zeitsignal hat den Vorteil, dass keine genaue Geschwindigkeitsmessung benötigt wird.

- Es können sowohl ganze Weichen als auch einzelne Bauteile detektiert werden. Die Ergebnisse der nachfolgenden Klassifikation unterscheiden sich dabei je nach verwendetem Verfahren recht deutlich, so dass Detektion und Klassifikation aufeinander abzustimmen sind.
- Die Parameter der Detektion sind an örtliche Gegebenheiten anzupassen, z. B. ob nur wenige, einzelne Weichen oder viele, direkt aufeinander folgende Weichen zu detektieren sind. Im letzteren Fall ist es mitunter sinnvoller, einzelne Bauteile zu extrahieren, als ein großes Ereignis, welches möglicherweise drei oder mehr Weichen beinhaltet.

In auf die Detektion folgenden Verarbeitungsschritten müssen in den extrahierten Signalmustern ggf. vorhandene Eisenbahnweichen wiedererkannt werden. Im folgenden Abschnitt wird detailliert auf die Klassifikation der detektierten Ereignisse – hier der Zuordnung zu gespeicherten Weichen-Referenzmustern – eingegangen.

3.4 Klassifikation von Eisenbahnweichen

Um zum einen eine absolute Ortsangabe zu erhalten und zum anderen die jeweilige Weichenstellung im Fahrweg zu erkennen, kann die Information, die im Weichen-Sensorsignal enthalten ist, verwendet werden. Ziel der Klassifikation ist die Erkennung der befahrenen Weichen und ihrer Stellung, wobei sich ähnliche Fragestellungen wie bei der digitalen Sprachsignalverarbeitung ergeben [61]:

1. Wie kann der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Sensorsignale beseitigt werden, bzw. wie können die zeitabhängigen Sensorsignale in eine Folge von Ereignissen umgesetzt werden?
2. Wie wahrscheinlich ist es überhaupt, dass ein bestimmtes Ereignis richtig klassifiziert wurde?
3. Welches ist bei gegebener Merkmalsfolge die wahrscheinlichste Zustandsfolge von Ereignissen?
4. Wie sollten bei einer modellgestützten Klassifikation die Modellparameter eingestellt werden, um die gegebenen Merkmalsfolgen am besten abzubilden?

Diese Fragen werden in den folgenden Unterabschnitten mit dem Ziel einer Ereignisklassifikation diskutiert.

3.4.1 Mustererkennung und Ähnlichkeit zwischen Signalen

Zum Vergleich zweier Signale und der Untersuchung ihrer Ähnlichkeit muss zunächst ein Maß für diese Ähnlichkeit definiert werden. Ein mögliches Distanzmaß zwischen einem Signal \mathbf{s} und einer Referenz \mathbf{r} mit jeweils N Elementen ist z. B. der Euklidische Abstand

$$D_{\mathbf{s}\mathbf{r}} = \|\mathbf{s} - \mathbf{r}\| = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (s_n - r_n)^2}. \quad (3.5)$$

Dieser wäre für identische Signale \mathbf{s} und \mathbf{r} gleich null, ansonsten immer größer null. Je kleiner der Abstand, desto ähnlicher sind sich die Signale.

Eine alternative Möglichkeit, die Ähnlichkeit zweier Signale \mathbf{s} und \mathbf{r} zu bestimmen, bedient sich der Kreuzkorrelationsfunktion (KKF), worauf in den Abschnitten 3.4.4 und 3.4.5 noch eingegangen wird.

Zum sinnvollen Vergleich der beiden Signale \mathbf{s} und \mathbf{r} müssen diese zunächst vorverarbeitet werden. Zum einen muss der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Signale beseitigt werden, um die Mustererkennung geschwindigkeitsunabhängig betreiben zu können. Dies wird in Abschnitt 3.4.2 beschrieben. Zum anderen würde eine unterschiedliche Amplitudenskalierung von Messung und Referenz den Abstand $D_{\mathbf{s}\mathbf{r}}$ erhöhen, obwohl die Signale ansonsten identisch wären. Hierauf wird in Abschnitt 3.4.3 eingegangen.

3.4.2 Beseitigung des Geschwindigkeitseinflusses

Um die gemessenen, geschwindigkeitsabhängigen Zeitsignale mit den gespeicherten Ortssignalen vergleichen zu können, ist eine Normierung auf die jeweilige Geschwindigkeit und damit die Konvertierung von zeitabhängigen Signalen $\mathbf{s}(t)$ in ortsabhängige Signale $\mathbf{s}(x)$ erforderlich⁷. Da bei der Konvertierung ein linearer Zusammenhang – in diesem Fall die Fahrzeuggeschwindigkeit – zwischen Zeit- und Ortssignal angenommen werden darf, ist jeweils eine Referenz

⁷Das Ortssignal $s(x) = s(x(t))$ lässt sich aus dem Zeitsignal $s(t)$ und dem zurückgelegte Weg $x(t)$ berechnen, welcher sich wiederum durch Integration aus der gefahrenen Geschwindigkeit $v(t)$ ergibt. Mithilfe dieses Wegverlaufs kann in einem Zeit-Weg-Diagramm zu jedem Abtastwert im Ortssignal der korrespondierende Messwert aus den Daten des Zeitsignals angegeben werden. Als Zielauflösung des Ortssignals hat sich ein Wert von 100 Abtastwerten pro Meter für die weitere Verarbeitung als praktikabel erwiesen. Bei einer verwendeten Abtastrate von 11,025 kHz bewirkt die Umrechnung bei Geschwindigkeiten bis 110 m/s auch eine Tiefpassfilterung durch eine lineare Interpolation der Messwerte.

pro zu klassifizierender Weiche (für jede Stellung, Fahrtrichtung und Schiene jeweils ein Referenzsignal) ausreichend. Die gleichartige Normierung des Messsignals erlaubt z. B. einen korrelativen Vergleich mit Referenzdaten, wie er in den Abschnitten 3.4.4 und 3.4.5 erläutert wird.

Liegt keine genaue Geschwindigkeitsinformation vor, entsteht mitunter ein nicht konstanter zeitlicher Versatz zwischen Messung und Referenz, und der korrelative Vergleich versagt. In diesem Fall liefert eine nichtlineare Skalierung der Zeitachse mit der Dynamischen Zeitverzerrung (engl. *dynamic time warping* – kurz DTW), welche in Abschnitt 3.4.6 beschrieben ist, wesentlich bessere Ergebnisse. Es genügt sogar, die Signale vor der Klassifikation jeweils auf eine einheitliche Länge zu skalieren, da die weitere Anpassung der Zeitachse durch die Dynamische Zeitverzerrung geschieht. Eine genaue Kenntnis der Fahrzeuggeschwindigkeit ist somit nicht erforderlich.

3.4.3 Amplitudenskalierung

Zusätzlich zur Normierung auf eine Geschwindigkeit müssen auch die Amplituden der Signale vor dem Vergleich normiert werden. Sinnvoll ist die Normierung z. B. so, dass das Signal s eine Energie von

$$E_s = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s_n^2} = 1 \quad (3.6)$$

besitzt. Somit wirken sich unterschiedliche Amplitudenskalierungen von Mess- und Referenzsignal nicht mehr negativ auf den Mustervergleich aus. Dies kann z. B. bei der Verwendung unterschiedlicher Verstärkungsfaktoren bei der Signalaufbereitung vorkommen. Bei der im folgenden Abschnitt beschriebenen Kreuzkorrelation wird inhärent eine Leistungsnormierung durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ρ_{sr} durchgeführt.

3.4.4 Korrelation von Ortssignalen

Bevor ein korrelativer Vergleich eines detektierten Ereignisses mit einer Referenz erfolgen kann, muss der Einfluss der Geschwindigkeit, welche sich als Streckung oder Stauchung der Signale bemerkbar machen kann, beseitigt werden, wie dies in Abschnitt 3.4.2 beschrieben wurde. Anschließend kann mit der normierten Kreuzkorrelationsfunktion

$$\rho_{sr}(\alpha) = \frac{\mathbf{s}(x) \otimes \mathbf{r}_i(x)}{\sigma_s \cdot \sigma_{r_i}} \quad (3.7)$$

zweier mittelwertfreier Signale die lineare Ähnlichkeit zwischen diesen, abhängig von der Ortsverschiebung $\alpha = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, bestimmt werden. Vergleicht man ein gemessenes Sensor-Ortssignal $s(x)$ mit einer Referenz $r_i(x)$, so gibt das Maximum des resultierenden Kreuzkorrelationskoeffizienten $\max\{\varrho_{\text{sr}}(\alpha)\}$ die jeweilige lineare Ähnlichkeit zwischen Messung und Referenz wieder. Für mittelwertfreie Signale der Länge N berechnet sich dieser zu

$$\varrho_{\text{sr}}(\alpha) = \frac{\Phi_{\text{sr}}(\alpha)}{\sigma_{\text{s}} \cdot \sigma_{\text{r}_i}} = \frac{1}{N \cdot \sigma_{\text{s}} \cdot \sigma_{\text{r}_i}} \sum_{n=0}^{N-1} s(n - \alpha) \cdot r_i(n). \quad (3.8)$$

Mit den Standardabweichungen σ_{s} und σ_{r_i} ergibt sich der Korrelationskoeffizient zu

$$\varrho_{\text{sr}}(\alpha) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} s(n - \alpha) \cdot r_i(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} r_{in}^2}} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} s(n - \alpha) \cdot r_i(n)}{E_{\text{s}} \cdot E_{\text{r}_i}}. \quad (3.9)$$

Für $\max\{\varrho_{\text{sr}}(\alpha)\} = 1$ ist das eine Signal ein skalares Vielfaches des anderen, bei Werten von $\max\{\varrho_{\text{sr}}(\alpha)\}$ nahe 0 sind die Signale unkorreliert.

Der zur Klassifikation benötigte Abstand D_{sr} zwischen Referenzsignal r_i und Messung s lässt sich aus dem maximalen Korrelationskoeffizienten $\varrho_{\text{sr,max}}$ herleiten. Aus Gl. (3.5) ergibt sich:

$$\begin{aligned} D_{\text{sr}} &= \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s_n^2 - 2s_n r_{in} + r_{in}^2} \\ &= \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s_n^2 + \sum_{n=0}^{N-1} r_{in}^2 - 2 \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot r_{in}} \\ &= \sqrt{E_{\text{s}}^2 + E_{\text{r}_i}^2 - 2 \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot r_{in}}. \end{aligned}$$

Bei nach Gl. (3.6) energienormierten Signalen ergibt sich für eine Ortsverschiebung $\alpha=0$ beim Einsetzen von Gl. (3.9) der Abstand zu

$$D_{\text{sr}} = \sqrt{2(1 - \varrho_{\text{sr,max}})}. \quad (3.10)$$

Eine wesentliche Voraussetzung für sinnvolle Ergebnisse der Kreuzkorrelation ist die Verwendung von Ortssignalen, wie in Abb. 3.14 für eine spezielle Weiche bei einer Messfahrt dargestellt.

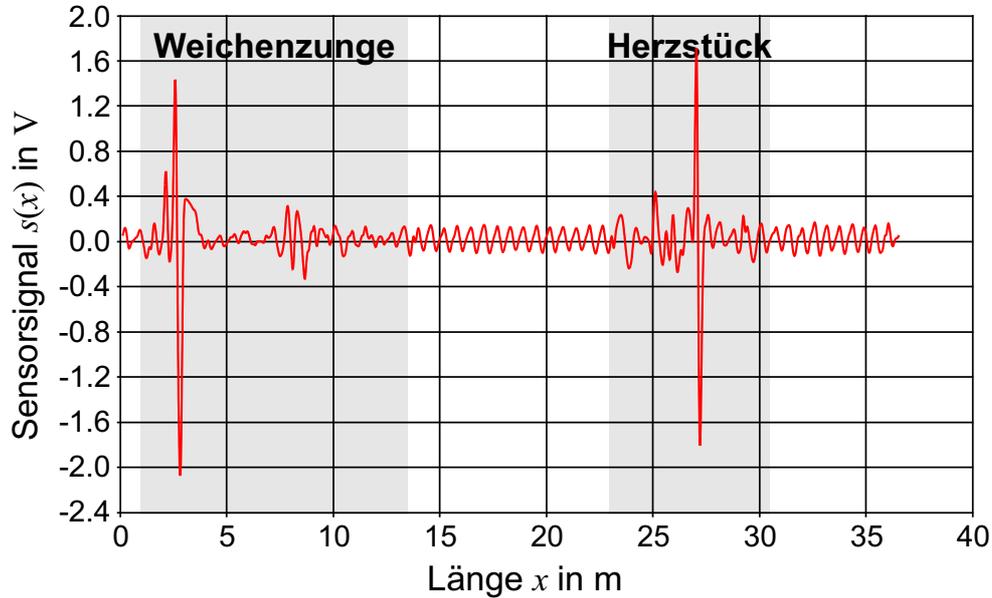


Abbildung 3.14: Sensorsignal $s(x)$ einer Weiche bei Testfahrt 1.

Das für die Klassifikation verwendete Referenzsignal derselben Weiche – bei einer anderen Messfahrt unter sonst weitgehend identischen Bedingungen aufgenommen – ist in Abb. 3.15 dargestellt.

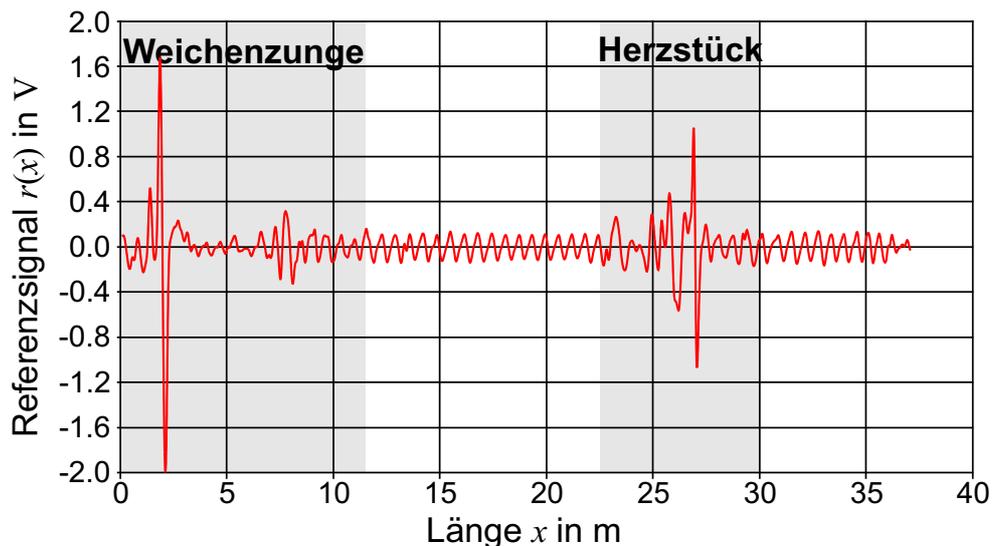


Abbildung 3.15: Referenzsignal $r(x)$ der Weiche aus Abb. 3.14 bei Testfahrt 2.

Obwohl beide Signale augenscheinlich große Ähnlichkeiten aufweisen, treten ins-

besondere im Bereich großer Signalamplituden gewisse Unterschiede auf. Das Drehgestell, an dem das Sensorgehäuse angebracht ist, wird beim Befahren von Weichenbauteilen recht großen, stoßartigen Kräften ausgesetzt, was wiederum Nichtlinearitäten im Sensorsignal verursachen kann. Daher ist der maximale Korrelationskoeffizient in diesen Bereichen oft niedriger als auf der freien Strecke [17], weil insbesondere bei den exponierten Weichenbauteilen das Signal stark von der exakten Position des Sensors abhängt. Hieraus ergeben sich Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsmessung.

Bei der Korrelation der obigen Signale liegt der maximale Korrelationskoeffizient $\max\{\varrho_{sr}(\alpha)\}$, wie aus Abb. 3.16 hervorgeht, nur bei etwa 55 %, woraus sich gemäß Gl. (3.10) ein Abstand D_{sr} zwischen der Messung s und der Referenz r von etwa 0,95 ergibt.

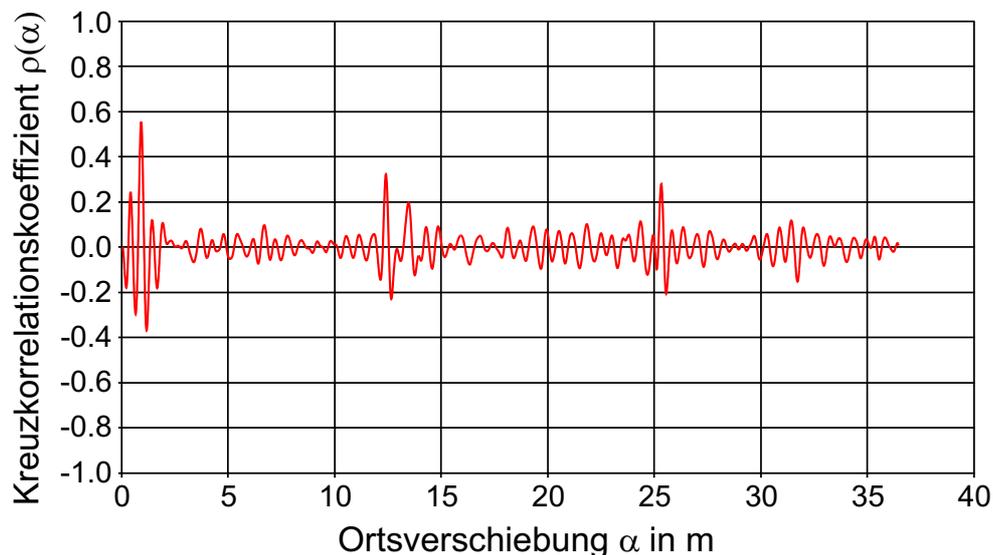


Abbildung 3.16: Verlauf des Korrelationskoeffizienten $\varrho_{sr}(\alpha)$ bei Kreuzkorrelation der Signale aus den Abb. 3.14 und 3.15.

Wesentlich höhere Korrelationskoeffizienten $\max\{\varrho_{sr}(\alpha)\}$ von 0,85 bis 0,95 – und damit Abstände D_{sr} von 0,55 bis 0,32 – liefert die in Abb. 3.17 skizzierte Klassifikation einzelner Weichenbauteile, d. h. es werden die kürzeren Signalblöcke der einzelnen Bauteile korreliert, so dass sich eine Drift in der Wegmessung nicht mehr so stark auswirken kann.

Zwar funktionierte die Korrelation in einigen Fällen besser als beim Vergleich ganzer Weichen, allerdings lassen sich Messungen mitunter nicht mehr individuellen Weichen direkt zuordnen, da der bauliche Abstand zwischen den Bauteilen als Merkmal zunächst verlorengeht. Ohne Zusatzwissen über den Fahrweg ist dann eine Klassifikation mit dem Ziel einer absoluten Ortung nicht mehr möglich.

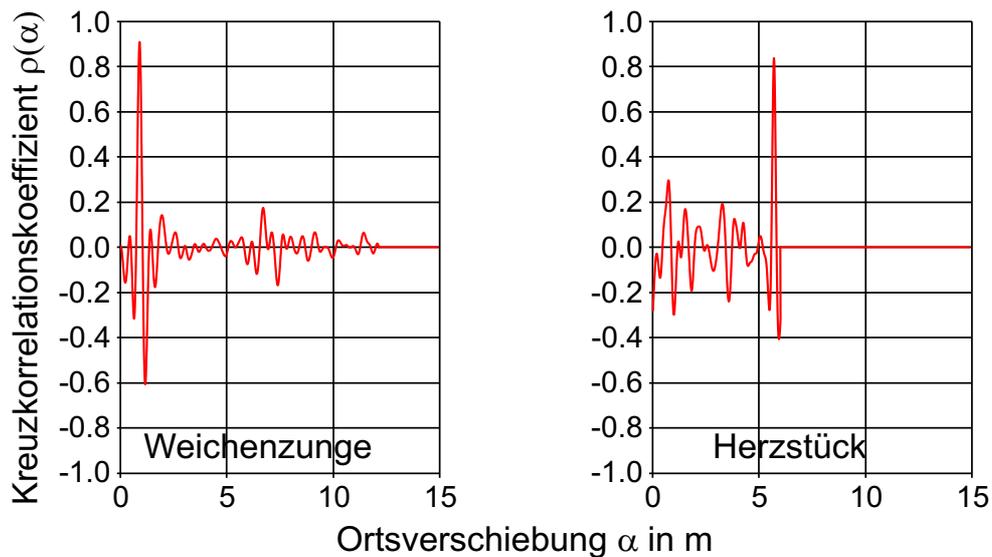


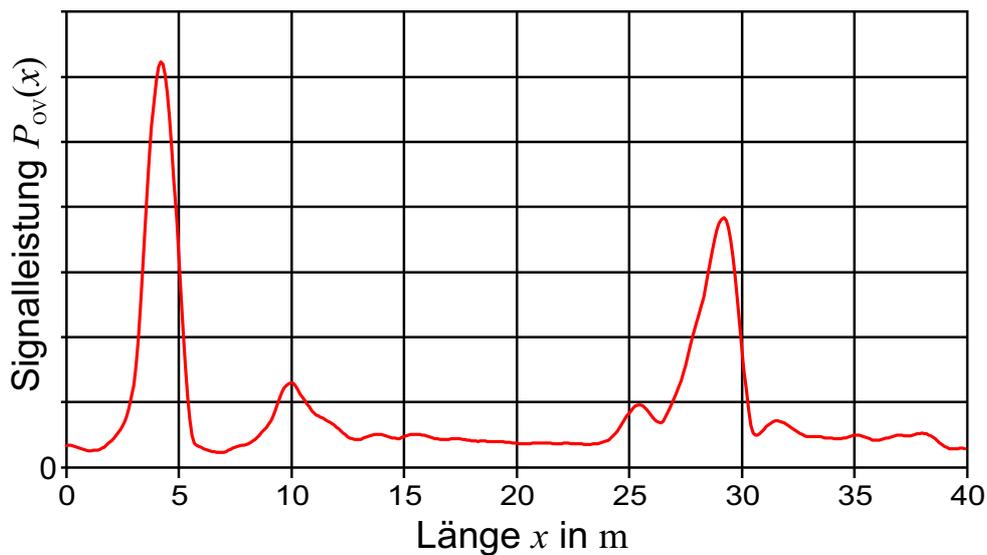
Abbildung 3.17: Verlauf des Korrelationskoeffizienten $\rho_{sr}(\alpha)$ bei Kreuzkorrelation der Signalblöcke einzelner Bauteile aus den Abb. 3.14 und 3.15.

3.4.5 Korrelation von Signaturen

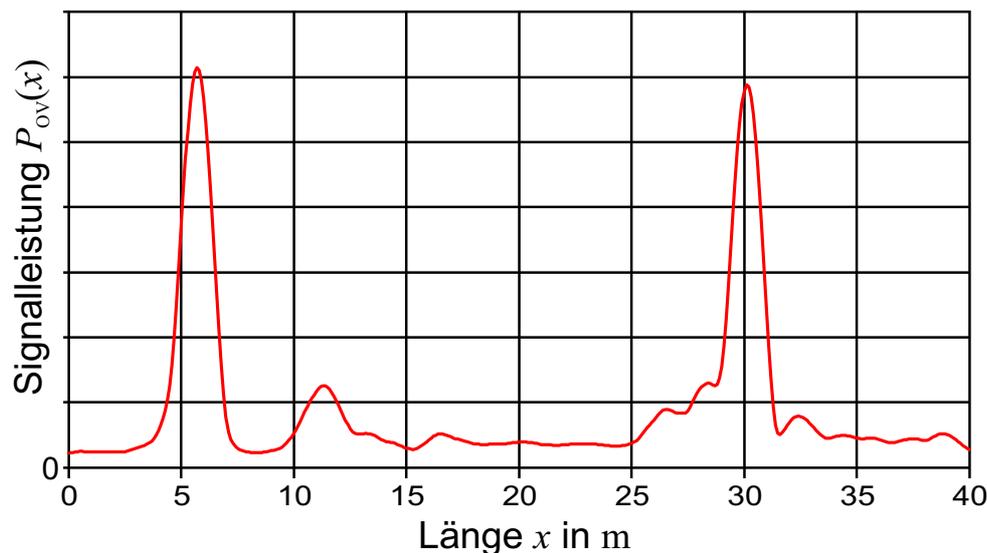
Anstelle eines direkten Vergleichs der Sensor-Ortssignale mit entsprechenden Referenzen kann auch eine spezifische Signatur der Weiche erstellt und dann mit Referenzsignaturen verglichen werden. Ein mögliches Verfahren nutzt die Eigenschaft, dass im Bereich von Weichenbauteilen die Signalleistung sehr groß ist, wohingegen außerhalb dieser Bauteile die Leistung eher klein und in einem engen Frequenzband lokalisiert ist. Der Verlauf der Gesamtleistung $P_{ov}(x)$ des Sensorsignals enthält somit Informationen über Position und Art der Weichenbauteile.

Abbildung 3.18(a) zeigt den örtlichen Verlauf der Signalleistung als beobachtetes Merkmal beim Befahren einer Weiche; das entsprechend für die Klassifikation verwendete Referenzsignal derselben Weiche ist in Abb. 3.18(b) dargestellt. Dabei sind, wie der Vergleich der Abb. 3.18(a) und 3.18(b) zeigt, die Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Messfahrten wesentlich größer, da Vorzeichen und Phaseninformation der Sensorsignale nicht berücksichtigt werden; allerdings wird damit die Unterscheidung gleichartiger Weichen schwieriger.

Wie aus den Abbildungen ersichtlich, ist nur die Positionsinformation von Weichenbauteilen mit hoher Signalleistung als relevantes Merkmal zu erkennen. Dies genügt aber, um einen bestimmten Weichentyp mit hinreichender Sicherheit zu klassifizieren. Der maximale Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho(\alpha)$ erhöht sich von 55 % (Originalsignale im Ortsbereich) auf 95 % bei Korrelation der Leistungssignaturen, womit sich der berechnete Abstand D_{sr} von 0,95 auf 0,32 vermindert.



(a) Testfahrt 1



(b) Testfahrt 2

Abbildung 3.18: Gemessene Signalleistung P_{ov} der Weiche aus Abb. 3.14.

Das Maximum der in Abb. 3.19 aufgetragenen Kreuzkorrelationsfunktion der Signaturen verbleibt dabei an derselben Position.

Berücksichtigt man für die Klassifikation mehrere Signaturen, welche aus unterschiedlichen Frequenzbändern erzeugt wurden, kann die Klassifikation an örtliche Gegebenheiten angepasst werden. Dabei können verschiedene Teilbänder des Spektrums berücksichtigt werden [54]. Eine wichtige Frequenz ist dabei die Schwellenfrequenz f_{cl} , d.h. die Frequenz, welche durch die Schienenbefestigungen erzeugt wird. Der Verlauf der Leistung der Schienenbefestigungen $P_{cl}(x)$

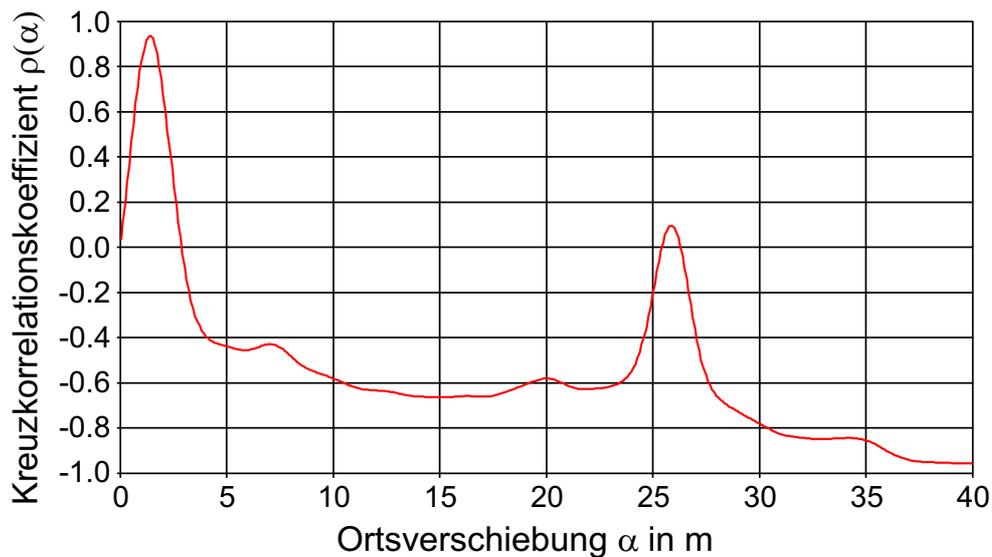


Abbildung 3.19: Verlauf des Korrelationskoeffizienten $\rho_{sr}(\alpha)$ bei Kreuzkorrelation der gemessenen Signaturen.

spielt auch eine wichtige Rolle bei der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ereignisdetektion. Die unterschiedlichen Signaturen der einzelnen Weichen können dann entsprechend bei der Klassifikation berücksichtigt werden. Etliche Messergebnisse zur Korrelation von Ortssignalen und Signaturen von Weichen sind in [54] zusammengefasst.

Bei der Korrelation – sowohl der Signalmuster als auch der Signaturen – spielt auch die gemessene Geschwindigkeit $v(t)$ bei der Normierung der Zeitsignale hin zu Ortssignalen eine wesentliche Rolle. Jeder Offset in der Geschwindigkeitsmessung bewirkt bei der Integration eine Drift des gemessenen Weges, was bereits bei Signalen von der Länge einer Eisenbahnweiche zu einer Verminderung des maximalen Korrelationskoeffizienten und damit zu einer Erhöhung des berechneten Abstands D_{sr} führt. Abhilfe schafft die Dynamische Zeitverzerrung, welche im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

3.4.6 Dynamische Zeitverzerrung

Die in den vorigen Abschnitten vorgestellten Verfahren zur Abstandsberechnung mithilfe der Kreuzkorrelationsfunktion beschreiben lediglich die linearen Ähnlichkeiten zwischen zwei Datensätzen von Wirbelstrom-Sensorsignalen. Wie in Abschnitt 3.4.4 deutlich gemacht, hängen gute Korrelationsergebnisse immer davon ab, wie gut der Geschwindigkeitseinfluss auf die Sensorsignale beseitigt wurde. Eine auch nur geringe Drift in der Wegmessung führt zu einer zunehmenden

Phasenverschiebung im Ortssignal und damit zu einer Verschlechterung der Korrelation. Dies könnte durch ein lineares Skalieren der Zeitachse beseitigt werden. Ist allerdings die Zeitachse nichtlinear verzerrt – wenn z. B. nur eine ungenaue oder gar keine Geschwindigkeitsinformation vorliegt – würde beim Vergleich zweier Signale s und r ein zu großer Abstand D_{sr} berechnet werden. Dies wird in Abb. 3.20 anhand eines Beispiels gezeigt.

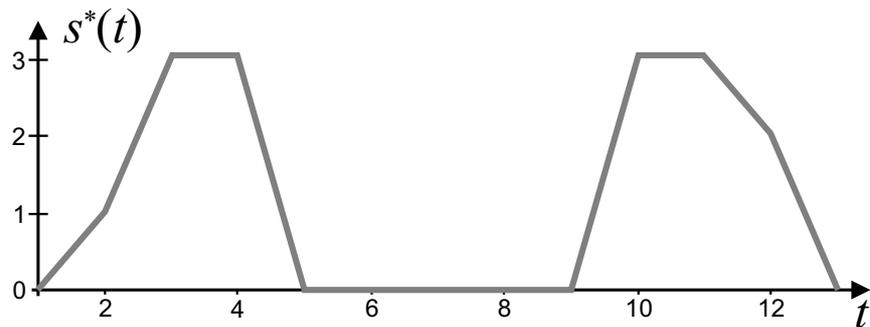
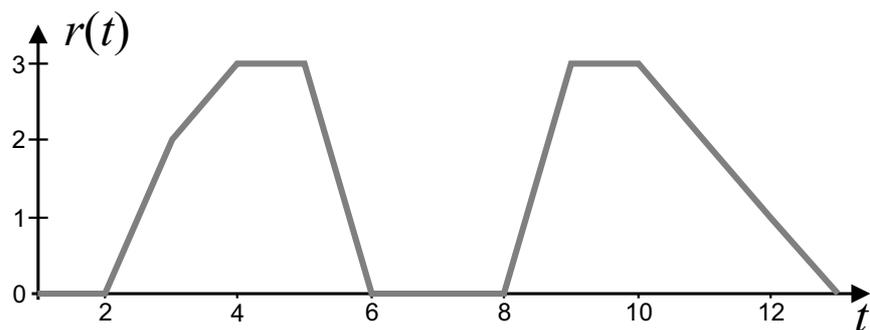
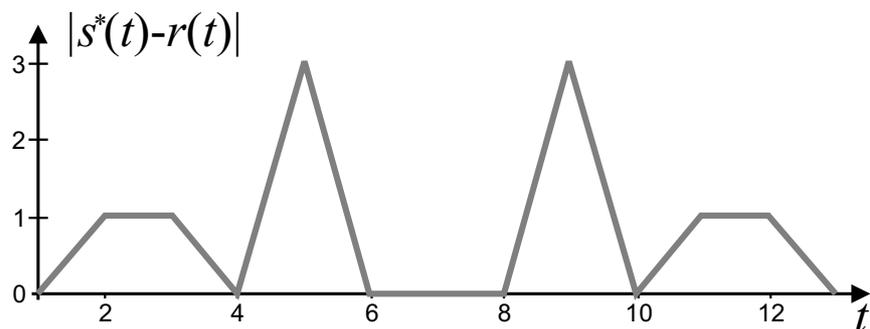
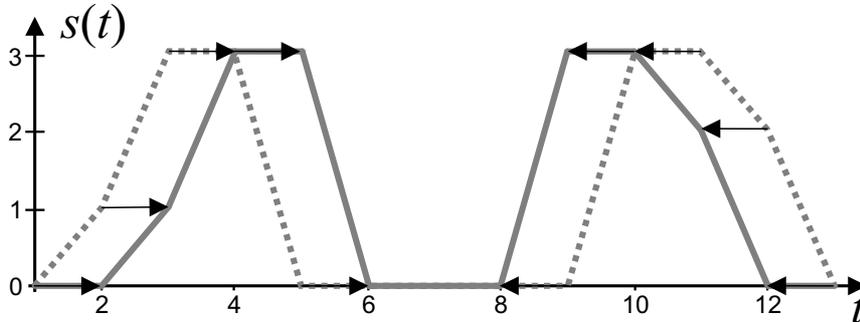
(a) Zu klassifizierendes Signal $s^*(t)$ (b) Referenz $r(t)$ (c) Punktweise berechnete Differenz $D_{sr} = |s^*(t) - r(t)|$

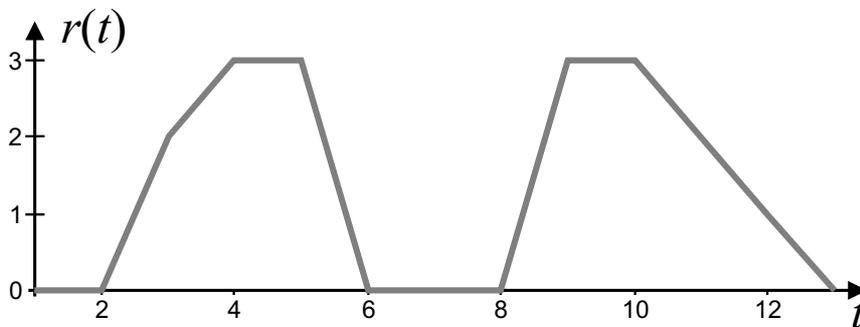
Abbildung 3.20: Vergleich eines Signals $s^*(t)$ mit einer Referenz $r(t)$.

Aus den augenscheinlich ähnlichen Signalen s^* und r ergibt sich auch bei optimaler Ausrichtung der Signale zueinander ein vergleichsweise großer Abstand D_{sr} , wie aus Abb. 3.20(c) ersichtlich.

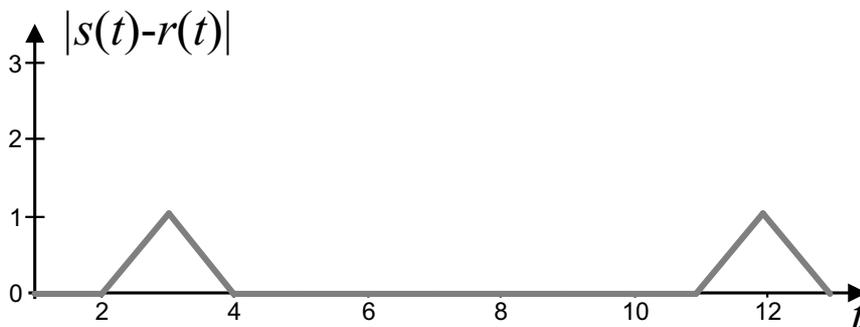
Wird allerdings eine zeitliche Variation bei der Bestimmung des Abstands erlaubt, lässt sich der verbleibende Abstand zwischen den Signalen deutlich verkleinern. Dies veranschaulicht Abb. 3.21.



(a) Mit der Dyn. Zeitverzerrung bearbeitetes Signal $s(t)$



(b) Referenz $r(t)$



(c) Punktweise berechnete Differenz $D_{SR} = |s(t) - r(t)|$

Abbildung 3.21: Vergleich eines mit der Dynamischen Zeitverzerrung bearbeiteten Signals $s(t)$ mit der Referenz $r(t)$ aus Abb. 3.20(b).

Das nunmehr auf der Zeitachse leicht verzerrte Signal s (Abb. 3.21(a)) wird wiederum mit der Referenz r verglichen. Der in Abb. 3.21(c) dargestellte Abstand ist deutlich kleiner, die Signale passen somit besser zueinander.

An dieser Stelle setzt die sogenannte Dynamische Zeitverzerrung an. Mit diesem z. B. in [18, 61] beschriebenen Algorithmus können zu vergleichende Muster op-

timal einander zugeordnet werden, so dass sich ihr Abstand minimiert. Damit genügt es, detektierte Signalmuster grob zu skalieren. Mithilfe der Dynamischen Zeitverzerrung kann dann der verbleibende Abstand D_{sr} berechnet werden. Einige Beispiele für mit diesem Verfahren berechnete Abstandsmaße beim Vergleich der Signalmuster von Eisenbahnweichen⁸ auf der *Albtalbahn* zeigt Tab. 3.1.

Tabelle 3.1: Größenordnung der mit der Dynamischen Zeitverzerrung ermittelten Abstandsmaße für eine bestimmte Weiche.

Zu vergleichende Weiche	D_{sr}
identisches Signal	0,00
identische Weiche bei anderer Messfahrt	0,07...0,15
gleiche Weichenstellung, ähnliche Weiche	0,30
andere Weiche bzw. Weichenstellung	0,40...0,60

Die Dynamische Zeitverzerrung benötigt zudem – anders als die Korrelation – keine exakte Geschwindigkeit, um brauchbare Ergebnisse zu erzielen; es genügt eine lineare Skalierung der Messsignale auf eine einheitliche Länge. Dies spielt insbesondere bei Ausfall eines Sensorkanals eine wichtige Rolle, da so die Weichenklassifikation zweikanalig redundant aufgebaut werden kann. Hierauf wird in Abschnitt 5.2.2 noch eingegangen.

Die Dynamische Zeitverzerrung eignet sich bereits zur Nutzung als Abstandsklassifikator [19]; es wird jeweils einfach zur Messung s die Referenz r_k zugeordnet, welche den kleinsten Abstand besitzt. Allerdings können die einzelnen Werte für D_{sr} je nach Messung starken Schwankungen unterliegen. Daher ist es für die Robustheit der Klassifikation von Vorteil, auf mehrere Datensätzen von gleichartigen Referenzen zurückzugreifen. Dies wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.4.7 Berücksichtigung mehrerer Referenzen

Mit den in den vorigen Abschnitten vorgestellten Verfahren Kreuzkorrelation und Dynamische Zeitverzerrung lässt sich eine einfache Abstandsklassifikation realisieren. Als Merkmale fungieren die assoziierten Datenpunkte zwischen einem gemessenen Signal s und einer Referenz r_i . Es wird genau die Referenz r_k gesucht, welche den geringsten Abstand zur Messung aufweist.

⁸Hierbei ist noch zu beachten, dass die Abstände für ähnliche Weichen bei gleicher Weichenstellung nicht immer geringer sind, als Weichen anderen Typs bzw. anderer Stellung. Dies liegt daran, dass bei der Extraktion der Weichenmuster aus dem Sensorsignal auch direkt der Weiche benachbarte Bereiche mit extrahiert werden. Diese können sich auch bei sonst identischen Weichen manchmal deutlich unterscheiden, z. B. wenn im direkten Anschluss an die Weiche ein Bahnübergang folgt.

Diese Vorgehensweise funktioniert nur unter der Voraussetzung, dass sich Referenzsignale mit einer einzigen Messung genau reproduzieren lassen. Allerdings unterliegen die Messungen, wie in Abschnitt 3.4.4 gezeigt, statistischen Einflüssen, so dass die Signale derselben Weiche bei verschiedenen Messfahrten nie exakt identisch sein werden. Diese Unschärfe kann bei der Klassifikation durch die Verwendung mehrerer Referenzdaten zur Beschreibung eines Ereignisses berücksichtigt werden. Entweder benutzt man Referenzdaten derselben Weiche, welche bei unterschiedlichen Messungen gewonnen wurden, oder es werden zur Klassifikation einer bestimmten Weiche die ermittelten Abstände zu mehreren unterschiedlichen Referenzen berücksichtigt. Hierauf wird in den folgenden Unterabschnitten eingegangen.

3.4.7.1 Mehrere Referenzdaten derselben Weiche

Vergleicht man das Signalmuster einer bestimmten Weiche mit Referenzmustern derselben Weiche, welche bei unterschiedlichen Messfahrten aufgenommen wurden, so erkennt man deutlich, dass der Abstand $\|\mathbf{r}_k - \mathbf{s}\|$ zwischen Referenz \mathbf{r}_k und Messung \mathbf{s} auch bei Optimierung durch die Dynamische Zeitverzerrung niemals null wird. In Tab. 3.2 sind die ermittelten Abstände zwischen Messung und Referenz für die Weichen 1090303 und 1090103 dargestellt.

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Weichenklassifikation für die Weichen 1090303 und 1090103 bei fünf unterschiedlichen Referenzen der Weiche 1090303.

Weiche	1090303	1090103
Referenz 1	0,09	0,34
Referenz 2	0,08	0,30
Referenz 3	0,07	0,30
Referenz 4	0,09	0,39
Referenz 5	0,16	0,30
Mittelwert	0,10	0,33

Die Verwendung mehrerer Referenzen derselben Weiche dient dazu, statistische Einflüsse auf die Messdaten zu vermindern. Als relevanter Abstand kann entweder der minimale Abstand – in obigem Beispiel der Wert 0,07 der Referenz 3 – oder der mittlere Abstand – in obigem Beispiel 0,10 – dienen. In beiden Fällen ist ein zur Klassifikation ausreichend großer Abstand zur Weiche 1090103, welche ein Signalmuster bei gleicher Weichenstellung repräsentiert, vorhanden.

Der in Abschnitt 3.4.8 beschriebene Bayes-Klassifikator bietet noch eine weitere Möglichkeit, mehrere Referenzdaten zu berücksichtigen: Es werden alle Wahr-

scheinlichkeiten aufsummiert, welche zur selben Klasse gehören. Dies erlaubt die Zusammenfassung unterschiedlicher Signalmuster verschiedener Weichen oder Weichenbauteile zu einer gemeinsamen Klasse, z. B. der gleichen Weichenstellung oder des gleichen Bauteiltyps. Hierauf wird bei der Darstellung der Messergebnisse in Abschnitt 3.4.10.4 näher eingegangen.

3.4.7.2 Erweiterung des Merkmalsvektors

Ein im Hinblick auf die bei der Weichenerkennung erreichbare Sicherheit der Klassifikation wichtiger Gedanke ist die Berücksichtigung mehrerer verschiedener Referenzdaten einer bestimmten Weiche, da dann zufällige Übereinstimmungen und damit falsche Klassifikationen unwahrscheinlicher werden. In den bisher gezeigten Verfahren wurden die Sensorsignale selbst als Merkmalsvektoren aufgefasst und damit ein Abstand zwischen Messung und Referenz berechnet. Wie aus Tab. 3.3 hervorgeht, ist nicht nur der Abstand zum „richtigen“ Referenzmuster ein charakteristisches Merkmal; auch der Abstand zu anderen Referenzmustern ist stets ähnlich und kann somit als Merkmal bei der Klassifikation ausgewertet werden.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Abstandsberechnung für die Weiche 1090303 bei drei unterschiedlichen Messfahrten.

Weichen-ID	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
1050103	0,34	0,34	0,36	0,35
1050300	0,42	0,41	0,40	0,41
1060103	0,29	0,29	0,29	0,29
1060200	0,42	0,43	0,42	0,42
...
1090103	0,29	0,30	0,31	0,30
1090202	0,40	0,31	0,36	0,36
1090303	0,09	0,08	0,07	0,08

Im erweiterten Merkmalsvektor sind die postulierten Abstände einer Weiche zu allen verfügbaren Referenzen berücksichtigt. Diese können durch eine Mittelung über mehrere Messungen gewonnen werden, wie in Tab. 3.3 anhand der Weiche 1090303 gezeigt. Bei einer nachfolgenden Messung werden nun ebenfalls die Abstände des zu klassifizierenden Musters zu allen Referenzmustern bestimmt. Der eigentliche Vergleich besteht dann in einer Differenzbildung zwischen den so gewonnenen Merkmalsvektoren. Einige Beispiele für bei Messungen auf der

Albtalbahn gewonnene Abstandsmaße beim Vergleich der erweiterten Merkmalsvektoren von Eisenbahnweichen zeigt Tab. 3.4.

Tabelle 3.4: Größenordnung der mit der Dynamischen Zeitverzerrung ermittelten Abstandsmaße für eine bestimmte Weiche bei erweitertem Merkmalsvektor.

Zu vergleichende Weiche	D_{sr}
identisches Signal	0,00
identische Weiche bei anderer Messfahrt	0,02. . . 0,03
gleiche Weichenstellung, ähnliche Weiche	0,04. . . 0,10
andere Weiche bzw. Weichenstellung	0,10. . . 0,16

Der Rechenaufwand bei der Klassifikation vergrößert sich damit nicht wesentlich, da die erweiterten Merkmalsvektoren – im Gegensatz zu den Signalmustern mit etwa 1000 Datenpunkten – vergleichsweise wenige Dimensionen haben, maximal die Anzahl aller verfügbaren Referenzweichen. Geschwindigkeitsbestimmend bleibt damit die Berechnung der Abstände zwischen Signal- und Referenzmustern. Messergebnisse mit erweiterten Merkmalsvektoren sind in Abschnitt 3.4.10.5 zusammengefasst.

3.4.8 Bayes'sche Signalklassifikation

Die aus dem Mustervergleich erhaltenen Merkmalsvektoren müssen bei der anschließenden Klassifikation sinnvoll statistisch bewertet werden. Eine mächtige Methode ist die Nutzung eines Bayes-Klassifikators. Der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Vergleich von detektierten Signalen mit in einer Datenbank abgespeicherten Referenzsignalen liefert z. B. die Referenz mit der größten Ähnlichkeit. Der Bayes-Klassifikator berechnet zusätzlich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Signal einem bestimmten Referenzmuster entspricht.

Das zu klassifizierende gemessene Signal $\mathbf{s}^*(x)$, bestehend aus N Messwerten, wird ggf. nach Vorverarbeitung als normierter Merkmalsvektor

$$\mathbf{s}(x) = (s(x_1), s(x_2), \dots, s(x_N))^T, \quad (3.11)$$

mit $\|\mathbf{s}(x)\|=1$ betrachtet.

Es existieren I Weichen in der Referenzdatenbank, welche durch abgespeicherte Referenzsignale \mathbf{r}_1 bis \mathbf{r}_I repräsentiert werden. Die Referenz der i -ten Weiche lautet

$$\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN})^T. \quad (3.12)$$

Die Referenzsignale sind ebenfalls normiert, d.h. $\|\mathbf{r}_i\|=1$. Anstelle der Wirbelstrom-Sensorsignale können die Merkmalsvektoren \mathbf{s} bzw. \mathbf{r}_i auch andere zum Vergleich geeignete Merkmale enthalten, wie dies z. B. in Abschnitt 3.4.7.2 beschrieben ist.

Die Wahrscheinlichkeit $P(k|\mathbf{s})$, dass eine bestimmte Weiche mit der Nummer k befahren wurde, wenn das Signal \mathbf{s} beobachtet wurde, die sogenannte *aposteriori-Wahrscheinlichkeit*, ergibt sich nach der Bayesschen Regel zu

$$P(k|\mathbf{s}) = \frac{p(\mathbf{s}|k) \cdot P(k)}{p(\mathbf{s})}. \quad (3.13)$$

Hierin ist der Normierungsfaktor $p(\mathbf{s})$ nicht von k abhängig, und die sogenannte *apriori-Wahrscheinlichkeit* $P(k)$ wird als gleichverteilt angenommen, sofern kein Vorwissen über die nächsten möglichen Weichen, z. B. aus einer digitalen Streckenkarte, in die Berechnung eingeht. Somit hängt $P(k|\mathbf{s})$ nur noch von $p(\mathbf{s}|k)$ ab⁹, und die sogenannte *Likelihood*

$$p(\mathbf{s}|k) = \mathcal{N}(\mathbf{s}, \mathbf{r}_k, \mathbf{K}_k) \quad (3.14)$$

kann bei Annahme einer multivariaten Gauß-Verteilung

$$\mathcal{N}(\mathbf{s}, \mathbf{r}_k, \mathbf{K}_k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} |\mathbf{K}_k|^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{r}_k - \mathbf{s})^T \mathbf{K}_k^{-1}(\mathbf{r}_k - \mathbf{s})\right) \quad (3.15)$$

bei gegebenen Signal \mathbf{s} als nur noch abhängig von der Referenz \mathbf{r}_k und der Kovarianzmatrix \mathbf{K}_k betrachtet werden, wobei \mathbf{K}_k vereinfachend als N -dimensionale Diagonalmatrix mit der konstanten Varianz σ_k^2 modelliert wird.

Damit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Weiche k befahren zu haben, wenn das Signal \mathbf{s} beobachtet wurde, zu

$$P(k|\mathbf{s}) = \frac{\exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{s}\|^2}{2\sigma_k^2}\right)}{\sum_{i=1}^I \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{s}\|^2}{2\sigma_i^2}\right)}. \quad (3.16)$$

Die Standardabweichung σ_k^2 zu jeder zu klassifizierenden Referenz k lässt sich empirisch schätzen:

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (r_{kn} - s_n)^2. \quad (3.17)$$

⁹Streng genommen ist nach der Anwendung der Dynamischen Zeitverzerrung auf das Signal $\mathbf{s}^*(x)$ das zeitverzerrte Signal $\mathbf{s}(x)$ von der jeweiligen Referenz \mathbf{r}_k abhängig. Der Einfluss auf die Klassifikation kann jedoch als vernachlässigbar gering angesehen werden, da zum einen die Anpassung an die Referenz recht strengen Restriktionen unterliegt, zum anderen das Referenzmuster bei den verschiedenen Messungen nicht verändert wird.

Unter der Voraussetzung $\sigma_k \approx \hat{\sigma}_k$ ergibt sich die Wahrscheinlichkeit zu

$$P(k|\mathbf{s}) = \frac{\exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{s}\|^2}{2\hat{\sigma}_k^2}\right)}{\sum_{i=1}^I \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{s}\|^2}{2\hat{\sigma}_i^2}\right)}. \quad (3.18)$$

Die Zahlenwerte für $\hat{\sigma}_k$ können dabei aus mehreren Messfahrten gemittelt und ebenfalls in der Referenz-Datenbank für die jeweilige Weiche abgespeichert werden. Dass diese Werte einen wesentlichen Einfluss auf die bei der Klassifikation berechneten Wahrscheinlichkeiten haben, wird in Abschnitt 3.4.10 deutlich. Eine Vereinfachung des Modells ergibt sich durch die Verwendung jeweils gleicher Werte von $\hat{\sigma}_k$ für alle Weichen. Im Prinzip handelt es sich dann um eine Minimierung des quadratischen Abstands zwischen Beobachtung und Referenz.

Die zur Beobachtung \mathbf{s} korrespondierende optimale Weiche k ergibt sich aus einer Maximierung von $P(k|\mathbf{s})$:

$$k = \arg \max_k P(k|\mathbf{s}). \quad (3.19)$$

Die mit dem Bayes-Klassifikator erzielten Messergebnisse bei unterschiedlichen Messfahrten auf der Referenzstrecke bei der *Albtalbahn* sind in Abschnitt 3.4.10 ausführlich dargestellt.

3.4.9 Maximal erlaubter Abstand

Bei der Klassifikation von Weichen sollte ein maximal erlaubter Abstand $D_0 = D_{\text{sr,max}}$ zwischen Messung und Referenz definiert werden. Alle Referenzmuster mit einem Abstand $D_{\text{sr}} \geq D_0$ können dann als „0-Weiche“, bzw. als Ereignis „Nicht in der Referenz-Datenbank vorhanden“ aussortiert werden. Bei der Klassifikation wird ein Ereignis „0-Weiche“ mit dem Abstand D_0 den Daten hinzugefügt. Damit kann der Bayes-Klassifikator eine Wahrscheinlichkeit angeben, dass das Ereignis entweder keine bekannte Weiche ist oder dass z. B. die Detektion versagt hat und eine Weiche nicht richtig erfasst wurde.

Die Auswahl eines Wertes für D_0 hat einen entscheidenden Einfluss auf die Weichenerkennung. Er muss größer sein als der höchste vorkommende Abstand zwischen zwei Mustern derselben Weiche, allerdings kleiner als der Abstand zu einer nicht der Referenz entsprechenden Weiche. Bei der Verwendung der Dynamischen Zeitverzerrung sollte der Wert gemäß Tab. 3.1 bei der Klassifikation bekannter Weichen zwischen 0,15 und 0,3 liegen. Der bei den Messungen beob-

achtete Einfluss von D_0 ist in Abschnitt 3.4.10.3 anhand eines Beispiels dargestellt. Sollen hingegen, wie in Abschnitt 3.4.10.7 beschrieben, unbekannte Weichen klassifiziert werden, dann ist D_0 auf einen Wert von mindestens 0,4 einzustellen.

3.4.10 Messergebnisse

Die im folgenden zusammengefassten Ergebnisse wurden bei verschiedenen Messfahrten auf der für die Tests befahrenen Strecke der *Albtalbahn* zwischen Bad Herrenalb und Busenbach in Fahrtrichtung Busenbach gewonnen. Die Topologie der Strecke, repräsentiert durch die nacheinander befahrenen Weichen, ist in Tab. 3.5 in der entsprechenden Reihenfolge aufgelistet. Die Nummerierung der Weichen ist in Abschnitt 4.2.1 erläutert.

Tabelle 3.5: Auf der Strecke von Bad Herrenalb nach Busenbach befahrene Weichen mit zugehörigem Weichentyp, Fahrtrichtung und Weichenstellung. Die Daten wurden einer digitalen Streckenkarte entnommen.

Weichen-ID	Weichentyp	Fahrtrichtung	Stellung
1090303	EW 49-190-1:7	stumpf	links
1090202	EW 49-190-1:7	stumpf	rechts
1090103	EW 49-300-1:9	stumpf	links
1080201	EW 41-190-1:8	spitz	links
1080102	IBW 41-500-1:12	stumpf	rechts
1070400	EW 49-300-1:9	spitz	rechts
1070303	EW 41-300-1:9	stumpf	links
1070102	EW 6-190-1:8	stumpf	rechts
1060200	EW 49-190-1:8	spitz	rechts
1060103	EW 49-190-1:8	stumpf	links
1050300	EW 49-240-1:9	spitz	rechts
1050103	EW 49-300-1:9	stumpf	links
1041200	EW (Typ unbekannt)	spitz	rechts

Jeweils sechs bei unterschiedlichen Messfahrten aufgenommene Signalmuster dieser zwölf Weichen waren in der Referenzdatenbank gespeichert und konnten zur Untersuchung der Klassifikation verwendet werden. Die Weichen-Referenzdaten wurden zunächst manuell, in späteren Versuchen automatisiert aus den Messdaten extrahiert. In beiden Fällen lieferte die Weichenklassifikation vergleichbare Ergebnisse. Zur Berechnung des Abstands $\|\mathbf{r}_k - \mathbf{s}\|$ zwischen Messung \mathbf{s} und Referenz \mathbf{r}_k wurde bei allen hier dargestellten Messergebnissen die in

Abschnitt 3.4.6 beschriebene Dynamische Zeitverzerrung benutzt. Zum einen liefert dieses Verfahren bei den vorhandenen Messdaten wesentlich zuverlässigere Ergebnisse als die Korrelation von Ortssignalen oder Signaturen, zum anderen besteht aufgrund der Tatsache, dass die Klassifikation auch mit nur einem Sensorkanal durchgeführt werden kann, die Möglichkeit eines komplett kanalweise redundanten Aufbaus der Klassifikation. Auf die hieraus resultierenden Vorteile wird in Kapitel 5 noch eingegangen.

3.4.10.1 Klassifikation bekannter Weichen

Zunächst soll die Aufgabe gelöst werden, bereits bekannte Weichen in einer Anzahl von Referenzmustern wiederzuerkennen. Bei der automatischen Sprachsignalverarbeitung würde dies der Erkennung von Wörtern von einem bestimmten, bereits vorher bekannten Sprecher entsprechen.

Ein detektiertes Signal wird, sofern kein Vorwissen über den möglichen Ort vorliegt, mit allen gespeicherten Referenzen verglichen. Für die Tests wurden hierzu zunächst zwölf Referenzmuster in der Datenbank abgelegt. Die Ergebnisse einer Messfahrt – hier wurde die Weiche 1090103 befahren – sind in Tab. 3.6 in der entsprechenden Reihenfolge aufgelistet.

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Weichenklassifikation für die Weiche 1090103 bei Messfahrt 1.

Weichen-ID	$\hat{\sigma}_k$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$
1090303	0,10	0,275	2,06 %
1090202	0,12	0,482	0,03 %
1090103	0,11	0,076	71,85 %
...
1070400	0,12	0,344	1,50 %
1070303	0,14	0,253	17,94 %
1070102	0,13	0,397	0,85 %
...

Aus den Messergebnissen wird deutlich, dass Weichen mit gleicher Befahrriichtung (Endziffer 3) einen geringeren absoluten Abstand zur Messung aufweisen, als Weichen mit anderer Befahrriichtung (hier Endziffern 0 und 2). Trotzdem weist die Weiche 1090103 den geringsten Abstand zur Messung auf, sie kann in den Referenzdaten eindeutig wiedererkannt werden.

Die Standardabweichungen $\hat{\sigma}_k$ wurden zunächst aus einem Testdatensatz von drei

unterschiedlichen Messfahrten gewonnen. Dass dieser Parameter die Klassifikationsergebnisse wesentlich beeinflussen kann, zeigt Tab. 3.7. Zwar können mit diesem Parameter die Klassifikationsergebnisse von nicht so sicher zu erkennenden Weichen verbessert werden, jedoch ist sicherzustellen, dass die Ergebnisse anderer Weichen nicht verfälscht werden.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Weichenklassifikation für die Weiche 1090103 bei Messfahrt 2.

Weichen-ID	$\hat{\sigma}_k$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$
1090303	0,10	0,334	0,75 %
1090202	0,12	0,487	0,05 %
1090103	0,11	0,190	43,87 %
...
1070400	0,12	0,344	3,23 %
1070303	0,14	0,263	33,84 %
1070102	0,13	0,369	3,53 %
...

Bei dieser Messfahrt zeigt die Klassifikation der Weiche 1090103 ein wesentlich schlechteres Ergebnis als bei den Messungen, welche zur Berechnung der apriori-Daten benutzt wurden, was sich aus der relativ kleinen Standardabweichung $\hat{\sigma}_k$ für diese Weiche ergibt. Der Bayes-Klassifikator hält dann die Weiche 1070303, welche vom gleichen Weichentyp wie die Weiche 1090103 ist, für ähnlich wahrscheinlich, obwohl der absolute Abstand der Weiche 1090103 zur Messung mit 0,190 tatsächlich deutlich geringer ist als der der Weiche 1070303 mit einem Wert von 0,263. Trotzdem lassen sich diese beiden Weichen aufgrund ihrer Ähnlichkeit nicht so eindeutig voneinander unterscheiden. Mit dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen HMM wird ein solcher Umstand entsprechend berücksichtigt.

3.4.10.2 Minimal erforderliche Ortsauflösung

Die Ortsauflösung des zu klassifizierenden Signals hat einen entscheidenden Einfluss auf das jeweilige Ergebnis. Sehr kleine Ortsauflösungen führen aufgrund der Unterabtastung mitunter zu falschen Klassifikationen; stabile Ergebnisse erhält man ab einer Ortsauflösung von 15 Samples pro Meter, wie in Abb. 3.22 sehr deutlich zu erkennen. Diese entspricht ungefähr der doppelten Ortsfrequenz der Sensoren von etwa 6 pro Meter [17], so dass eine Unterabtastung der Signale vermieden wird.

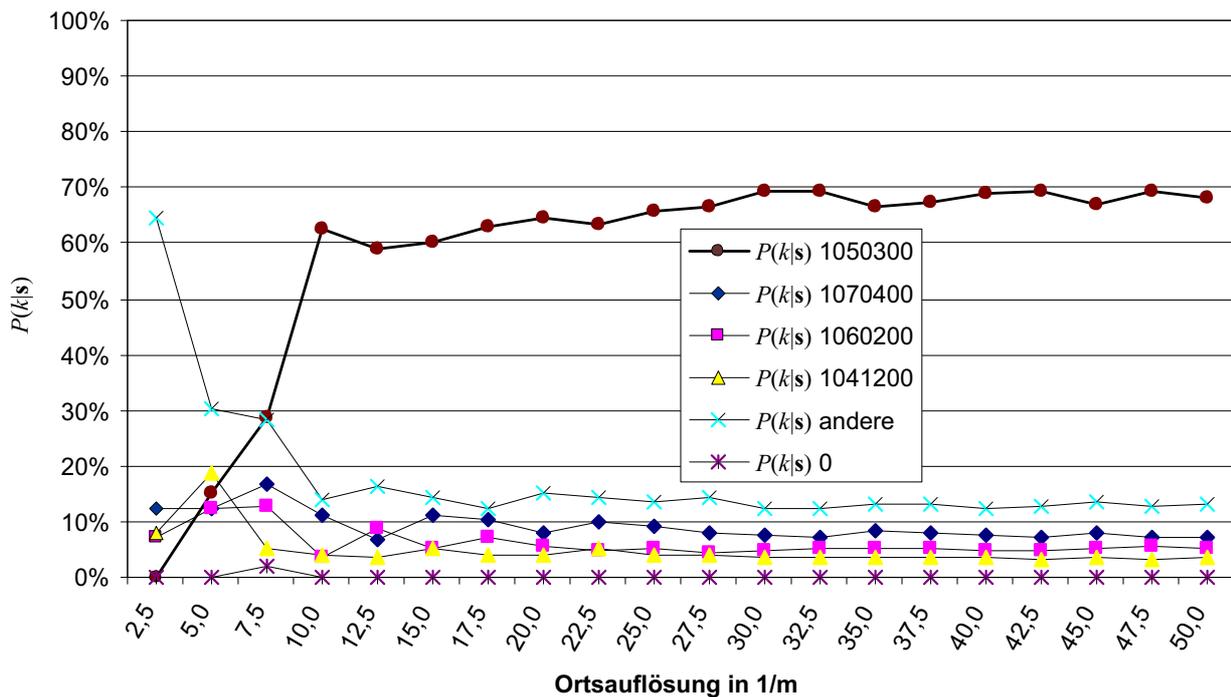


Abbildung 3.22: Einfluss der Ortsauflösung auf die Klassifikation der Weiche 1050300, $D_0 = 0,4$.

Eine aus einem zu kleinen Datenvektor resultierende Unterabtastung der Signale kann z. B. zu Aliasing-Effekten führen, was sich im hier gezeigten Beispiel in falschen Klassifikationsergebnissen widerspiegelt. Für die folgenden Untersuchungen wurde eine Ortsauflösung von etwa 25 Samples pro Meter angestrebt, um eine eventuelle Unterabtastung und die damit verbundenen Auswirkungen sicher zu vermeiden. Bei einer mittleren Länge der im Albtal vorhandenen Weichen von ca. 30 bis 40 m entspricht dies einer Länge des Datenvektors von 1000 Samples. Sollen hingegen die mit einer Länge von maximal 10 m wesentlich kürzeren Weichenbauteile klassifiziert werden, genügen entsprechend kleinere Datenvektoren.

3.4.10.3 Einstellung des maximal erlaubten Abstands

Wie bereits in Abschnitt 3.4.9 erläutert, ist es sinnvoll, bei der Klassifikation eine 0-Weiche mit dem vorgegebenen Abstand D_0 zu definieren. Dieser Abstand dient als Schwellwert zwischen bekannten und unbekanntem, also nicht in der Datenbank vorhandenen Weichen. Dass D_0 nicht zu klein gewählt werden sollte, geht aus Abb. 3.23 hervor. Die Erkennung dieser Weiche wurde durch eine schlechtere Signalqualität erschwert, der gemessene Abstand von 0,22 zwischen Messung und Referenz war deutlich größer als bei den anderen Messungen.

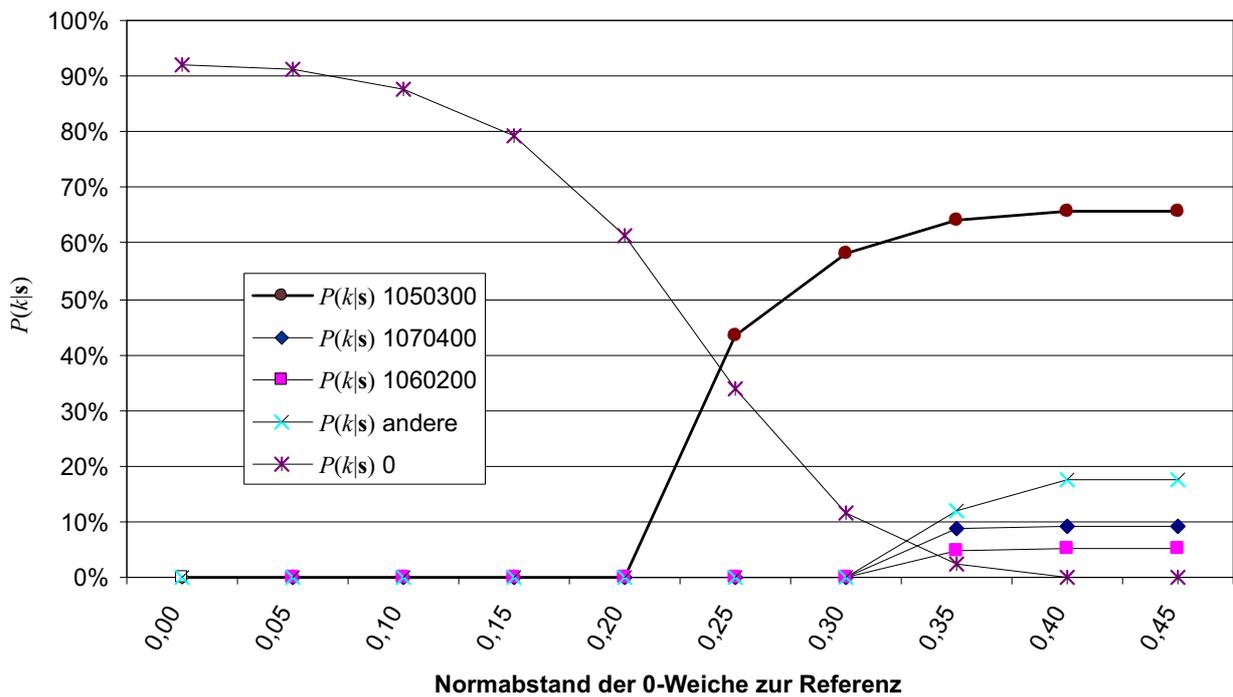


Abbildung 3.23: Einfluss des maximal erlaubten Abstands auf die Klassifikation der Weiche 1050300.

Ein kleiner erlaubter Abstand D_0 bewirkt, dass der Klassifikator erst bei relativ sicherer Klassifikation als Ergebnis eine Weiche ausgibt. Bei schlechter Signalqualität werden allerdings möglicherweise auch bekannte Weichen als unbekannt aussortiert. Daher muss dieser Parameter an die entsprechenden Bedürfnisse angepasst werden, je nachdem wie die Anforderungen an Sicherheit und Verfügbarkeit der Weichenerkennung sind. Große Werte für D_0 erhöhen die Verfügbarkeit, kleine Werte hingegen die Sicherheit, die die Weichenklassifikation bietet.

3.4.10.4 Klassifikation mit mehreren Referenzdaten

Bisher wurden Messungen gezeigt, bei denen detektierte Ereignisse einer speziellen Weiche zugeordnet werden sollten, wobei jedes mögliche Ereignis durch genau ein Referenzmuster repräsentiert wurde. Liegen Messdaten mehrerer Versuchsfahrten vor, so kann zum Eintrag in die Datenbank anhand von Vergleichen das Referenzmuster bestimmt werden, welches die besten Klassifikationsergebnisse liefert. Das optimale Referenzmuster $\mathbf{r}_{k_i, \text{opt}}$ ist das mit den größten Ähnlichkeiten zu allen übrigen Referenzmustern desselben Ereignisses:

$$\mathbf{r}_{k_i, \text{opt}} = \arg \min_i \{ D_{k_i k_j \neq i} \}. \quad (3.20)$$

Eine andere Möglichkeit ist die Repräsentation einer bestimmten Klasse k – hier einer speziellen Weiche – jeweils durch M Referenzmuster $k_1 \dots k_M$. Detektierte Ereignisse werden dann wie vorher mit allen in der Datenbank vorhandenen Mustern verglichen; die Wahrscheinlichkeiten von Referenzen k_i , welche derselben Klasse k angehören, werden dann aufsummiert:

$$P(k|\mathbf{s}) = \sum_{m=1}^M P(k_m|\mathbf{s}). \quad (3.21)$$

Dies entspricht einer Modellierung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion als Gauß'sche Mischverteilung

$$p(\mathbf{s}|k) = \sum_{m=1}^M a_m \cdot p(\mathbf{s}|k_m), \quad (3.22)$$

mit $\sum_{m=1}^M a_m = 1$.

Für eine Messung bei jeweils vier vorliegenden Referenzen k_m sind die Ergebnisse in Abb. 3.24 dargestellt.

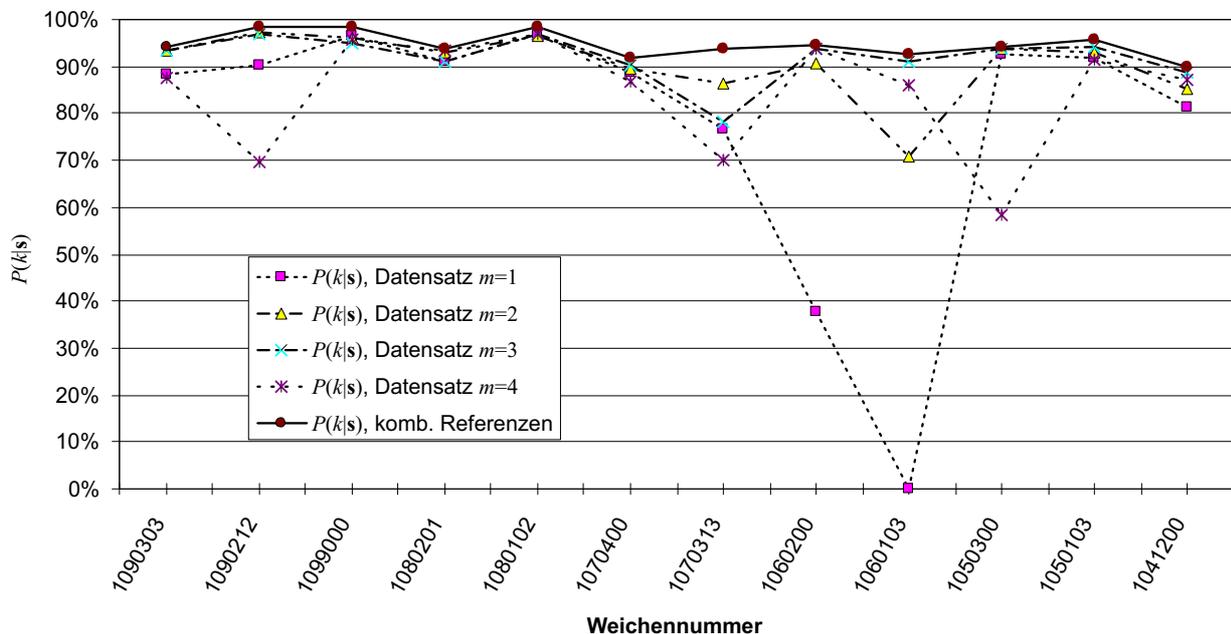


Abbildung 3.24: Klassifikation mit mehreren Referenzmustern.

Man kann aus Abb. 3.24 deutlich erkennen, dass z. B. die Klassifikation bei der Weiche 1060103 nicht funktioniert hätte, wenn nur der Datensatz 1 als Referenz vorgelegen hätte. Durch die Summation wurde für alle Weichen ein Klassifikation

mit einer Wahrscheinlichkeit von stets größer als 90 % erreicht. Einzelne Ausreißer wirken sich damit nicht mehr so stark auf das Ergebnis aus, folglich steigt die Verfügbarkeit der Klassifikation an.

3.4.10.5 Messungen mit erweitertem Merkmalsvektor

Zur Untersuchung der Klassifikation mit dem in Abschnitt 3.4.7.2 beschriebenen erweiterten Merkmalsvektor wurden zunächst für jede Weiche die mit der Dynamischen Zeitverzerrung aus vier Messfahrten ermittelten Abstände zu allen Referenzen gemittelt und als Referenz-Merkmalsvektor gespeichert. Die nachfolgenden Messergebnisse wurden aus Daten einer fünften Messfahrt gewonnen. Tabelle 3.8 zeigt einen direkten Vergleich der Klassifikation der Weiche 1090303 mittels des einfachen und des erweiterten Merkmalsvektors. Für den Wert von $\hat{\sigma}_k$ bei der Messung mit dem erweiterten Merkmalsvektor wurde aufgrund der zu geringen Anzahl unterschiedlicher Messungen ein Durchschnittswert über alle Messungen von 0,024 ermittelt.

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Weichenklassifikation für die Weiche 1090303 mit einfachem bzw. erweitertem Merkmalsvektor.

Merkmalsvektor	einfach			erweitert	
Weichen-ID	$\hat{\sigma}_k$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$
1090303	0,10	0,155	58,73 %	0,019	98,88 %
1090202	0,12	0,338	3,68 %	0,085	0,26 %
1090103	0,11	0,305	4,21 %	0,085	0,26 %
1080201	0,12	0,487	0,05 %	0,134	0,00 %
1080102	0,13	0,283	18,48 %	0,142	0,00 %
1070400	0,12	0,392	0,95 %	0,115	0,00 %
1070303	0,14	0,351	8,52 %	0,094	0,06 %
1070102	0,13	0,531	0,05 %	0,085	0,26 %
...

Bereits anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass durch die Einbeziehung mehrerer unterschiedlicher Referenzdaten zufällige Übereinstimmungen zwischen Messung und Referenz weniger wahrscheinlich werden. So lässt sich die im Vergleich zu den übrigen Referenzen große Ähnlichkeit der Weiche 1080102 bei der Klassifikation mit dem erweiterten Merkmalsvektor nicht mehr beobachten. Die mit dem Bayes-Klassifikator berechneten Wahrscheinlichkeiten werden sozusagen auf wenige, aber dafür gut passende Referenzen „konzentriert“.

Liegt allerdings eine qualitativ schlechte Messung vor, z. B. aufgrund eines ungenau ausgeschnittenen Ereignisses, so bewirkt die Erweiterung des Merkmalsvektors nicht immer eine Verbesserung. Als repräsentatives Beispiel hierfür ist in Tab. 3.9 das Klassifikationsergebnis für die Weiche 1090103 dargestellt.

Tabelle 3.9: Ergebnisse der Weichenklassifikation für die Weiche 1090103 mit einfachem bzw. erweitertem Merkmalsvektor.

Merkmalsvektor	einfach			erweitert	
Weichen-ID	$\hat{\sigma}_k$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$
1090303	0,10	0,392	0,29 %	0,079	1,47 %
1090202	0,12	0,584	0,01 %	0,105	0,02 %
1090103	0,11	0,243	55,14 %	0,051	34,61 %
...
1070400	0,12	0,389	3,36 %	0,105	0,02 %
1070303	0,14	0,342	32,25 %	0,044	61,65 %
1070102	0,13	0,466	1,03 %	0,107	0,02 %
...

Bei dieser Messung wurde für die zu klassifizierende Weiche 1090103 ein eigentlich zu großer Abstand ermittelt, was auf eine ungenauere Detektion bzw. Extraktion des Signals schließen lässt. Im direkten Vergleich wird die Weiche trotzdem noch als richtig erkannt, allerdings mit einer recht niedrigen Wahrscheinlichkeit von nur gut 55 %. Bei der Verwendung des erweiterten Merkmalsvektors sinkt die Wahrscheinlichkeit noch weiter auf knapp 35 %, wohingegen die Wahrscheinlichkeit für die Weiche 1070303 von 32 % auf über 60 % ansteigt. Ohne Berücksichtigung von Vorwissen würde die Weiche somit falsch erkannt werden. Hierzu muss allerdings gesagt werden, dass es sich, wie aus Tab. 3.5 hervorgeht, bei den Weichen 1090103 und 1070303 um identische Weichentypen handelt, welche in gleicher Stellung befahren wurden. Ähnlichkeiten zwischen den Merkmalsvektoren sind daher systematischer Natur und lassen sich mit einer entsprechenden Modellierung berücksichtigen.

3.4.10.6 Klassifikation von Weichenbauteilen

Ein Vorteil der Klassifikation von Weichenbauteilen ist, dass aufgrund der größeren Anzahl von Ereignissen mehr als doppelt so viele Positionsmessungen möglich sind als bei der Klassifikation von ganzen Weichen. Die Ergebnisse der Klassifikation unterscheiden sich dabei nicht wesentlich, wie Tab. 3.10 zeigt. Für

die Messung wurden Referenzdaten von acht Weichen verwendet, was bereits 19 unterschiedlichen Bauteilen entspricht.

Tabelle 3.10: Ergebnisse der Bauteilklassifikation für das Herzstück der Weiche 1090103 bei einer Messfahrt.

Weichen-ID	$\hat{\sigma}_k$	$\ \mathbf{r}_k - \mathbf{s}\ $	$P(k \mathbf{s})$
10903031	0,11	0,113	99,20 %
10903033	0,11	0,413	0,14 %
10903034	0,11	0,635	0,00 %
10902022	0,11	0,547	0,00 %
10902025	0,11	0,584	0,00 %
10901033	0,11	0,489	0,01 %
10901034	0,11	0,565	0,00 %
...

In diesem Beispiel wird das Herzstück der richtigen Weiche mit einer hohen Wahrscheinlichkeit versehen und damit mit großer Sicherheit richtig erkannt. Allerdings unterliegen die Klassifikationsergebnisse bei der Verwendung von einzelnen Bauteilen größeren Schwankungen, als bei ganzen Weichen. Hierfür sind zwei Ursachen maßgeblich:

- Bei den im Vergleich zu den ganzen Weichen eher kurzen Bauteilen spielt das richtige Ausschneiden eine noch größere Rolle. Unsicherheiten bei der Extraktion wirken sich damit stärker auf die Klassifikation aus.
- Der bauliche Abstand zwischen den Bauteilen geht zunächst nicht mehr in die Klassifikation ein. Damit fehlt ein Merkmal, welches im Signal der ganzen Weiche noch vorhanden ist. Aus diesem Grund lassen sich Signalmuster von Bauteilen nicht immer eindeutig einer bestimmten Weiche zuordnen, wie bereits in Abschnitt 3.4.4 bei der Korrelation von Weichenbauteilen erläutert.

Die Messergebnisse für drei Weichen in einem Bahnhof finden sich in Abb. 3.25. Dargestellt ist hier eine Messung mit nur einem Referenzdatensatz, welcher allerdings sehr gute Ergebnisse liefert. Die Kombination aus vier unterschiedlichen Datensätzen, analog zu Abschnitt 3.4.10.4, liefert hier keine signifikante Verbesserung der Klassifikation.

Besonders unsicher ist die Klassifikation der Zungenspitzen, hier die Ereignisse mit der Endziffer 4. Diese vergleichsweise kurzen Signale ähneln sehr denen von Schienenstößen und sind damit nicht immer eindeutig einer speziellen Weiche

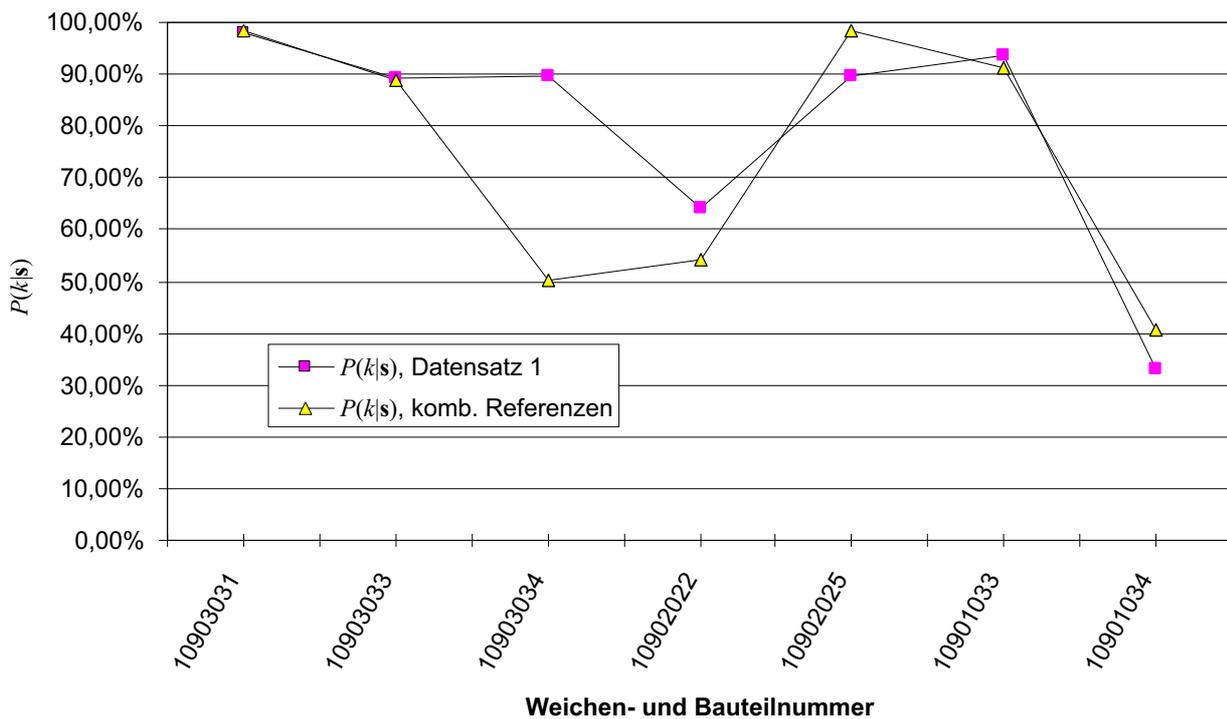


Abbildung 3.25: Klassifikation von Weichenbauteilen mit mehreren Referenzmustern.

zuzuordnen, wie hier beim Bauteil 10901034 zu erkennen. Des weiteren können Schienenstöße auch fälschlicherweise als Zungenspitze erkannt werden. Abhilfe schafft in beiden Fällen eine ortsselektive Klassifikation, bei der Vorwissen aus einer Streckenkarte die Zuordnung zwischen Ereignis und der momentanen Fahrzeugposition erlaubt. Hierauf wird in Abschnitt 4.4.3 eingegangen.

3.4.10.7 Klassifikation unbekannter Weichen

Eine Herausforderung bei der automatischen Sprachsignalverarbeitung ist die sprecherunabhängige Spracherkennung, also eine Klassifikation ohne das Vorliegen spezieller, sprecherspezifischer Referenzmuster. Zwar liegt der wesentliche Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Klassifikation bekannter Weichen, jedoch wird im folgenden die grundsätzlich mögliche Anwendung der beschriebenen Verfahren auch in unbekanntem Terrain anhand eines Beispiels gezeigt.

Für die Anwendung der Weichenerkennung zur Ortung ist das Verhalten der Klassifikation insbesondere beim Befahren unbekannter Strecken interessant. In diesem Fall kann zwar einer Messung keine spezielle Referenz zugeordnet werden, jedoch ist hier das Ziel, bei den detektierten Weichen deren Stellung und Befahr- richtung sowie den Weichentyp zu klassifizieren. So kann die Fahrtroute auch

ohne das Vorliegen von genauen Referenzdaten erfolgen, sofern zumindest eine topologische Streckenkarte (siehe Abschnitt 4.1.1.2) zur Auswertung herangezogen werden kann. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Datenhaltung der Referenzdaten vorteilhaft, da sich der Umfang der zu pflegenden Daten wesentlich verringert.

Für drei ausgewählte Weichen sind die Ergebnisse der Klassifikation in Tab. 3.11 zusammengefasst. Gemäß Gl. (3.21) wurden die Wahrscheinlichkeiten aller Weichen mit gleicher Weichenstellung und Fahrtrichtung aufsummiert. $P(k|s)$ ist die Wahrscheinlichkeit, die der Klassifikator für die jeweils richtige Weichenstellung und Fahrtrichtung ausgibt.

Tabelle 3.11: Bei einer Messfahrt auf der *Albtalbahn* befahrene „unbekannte“ Weichen und ihre mit dem Klassifikator erkannte Stellung.

Weichen-ID	Weichentyp	Fahrtrichtung/Stellung	$P(k s)$
1040400	EW 49-190-1:9	spitz/rechts	81,16 %
1040103	EW 49-300-1:10,5	stumpf/links	47,13 %
1031303	EW 49-190-1:8	stumpf/links	68,51 %

Für die drei hier nur exemplarisch dargestellten Weichen konnten Stellung und Fahrtrichtung jeweils als die Klasse k mit der maximalen Wahrscheinlichkeit $P(k|s)$ richtig erkannt werden. Auch der erweiterte Merkmalsvektor, dessen Ergebnisse in Abschnitt 3.4.10.5 dargestellt sind, kann ebenfalls Ähnlichkeiten zwischen Weichen gleichen Typs erkennen. Allerdings ist bei der automatisierten Detektion das extrahierte Signal auch abhängig von der Infrastruktur direkt vor bzw. nach der Weiche, weshalb verschiedene Weichen gleichen Typs nicht immer auch einen entsprechend geringen Abstand zueinander aufweisen.

3.4.10.8 Fazit

Die Weichenerkennung mit dem Wirbelstrom-Sensorsystem erlaubt es, Positionen auf einer Eisenbahnstrecke anhand von Ortsmarkierungen wiederzufinden. Im Gegensatz zu Balisen bzw. Ortsbaken, welche am Gleis installiert werden müssen, genügen für den Wirbelstrom-Sensor bereits vorhandene Bauteile, insbesondere Weichen. Aus den Messergebnissen, welche bei Testfahrten auf der *Albtalbahn* gewonnen wurden, lassen sich einige Schlussfolgerungen zur Machbarkeit einer Positionsmessung mit der Weichenerkennung ziehen:

- Eine bekannte Weiche und ihre Stellung bzw. die Fahrtrichtung kann in einer nicht zu großen Menge verschiedener Weichen eindeutig wiedererkannt

werden.

- Die Bestimmung des Abstands zwischen Mess- und Referenzsignal ist mit der Dynamischen Zeitverzerrung sehr gut möglich, auch ohne besondere Anforderungen an die Signalvorverarbeitung.
- Zur Klassifikation genügt bereits ein einziger Satz von Referenzdaten der einzelnen Weichen.
- Je nach Anforderungen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die Unschärfe in Mess- bzw. Referenzdaten abzubilden.
- Der Bayes-Klassifikator erlaubt die Zuordnung zwischen dem gemessenen Abstand und einer bestimmten Klasse.
- Es ist möglich, sowohl Weichen als Ganzes als auch einzelne Weichenbauteile zu klassifizieren.
- Das Einbeziehen von Vorwissen kann die Klassifikation entscheidend verbessern.

Da der Umfang des Wortschatzes – hier die Anzahl der zu klassifizierenden Weichen – bei der Anwendung zur Weichenerkennung sehr begrenzt ist, erscheint die Datenhaltung und -erfassung von Referenzdaten unproblematisch; es genügt zur zuverlässigen Klassifikation bereits in der Regel ein einziges Referenzmuster der Weiche. Die Klassifikation bekannter und insbesondere unbekannter Weichen (siehe Abschnitt 3.4.10.7) kann durch die Anwendung statistischer Modelle (siehe Abschnitte 4.3 und 4.4) ermöglicht bzw. verbessert werden, indem Vorwissen über die Streckeninfrastruktur für die Klassifikation genutzt wird. Hierdurch lassen sich falsche bzw. unsinnige Ergebnisse vermeiden. Wichtig bei der Klassifikation ist die richtige und möglichst genaue Modellierung der Referenzdaten. Im folgenden Kapitel wird dargelegt, wie das Vorwissen über die befahrene Infrastruktur zur Klassifikation herangezogen werden kann. Im Vordergrund steht dabei die Modellierung der Infrastruktur.

4 Modellierung der Infrastruktur

In den vorangegangenen Kapiteln wurde vor allem die Sensorik und Signalverarbeitung zur Gewinnung einer Positionsinformation – hier bestehend aus einer an Referenzpunkten synchronisierten Wegmessung – erläutert. Zur Ortung eines Schienenfahrzeugs muss diese Positionsinformation weiterverarbeitet werden; die Positionsdaten müssen bewertet und der vorhandenen Infrastruktur, also den möglichen Fahrwegen, zugeordnet werden. Für den Eisenbahnbetrieb sind z. B. Positionsdaten, welche lediglich aus geographischen Koordinaten bestehen, weitgehend nutzlos. Unerlässlich sind hingegen Informationen über belegte bzw. freie Gleise und Strecken. Zur Realisierung dieser Anforderung soll die im vorigen Kapitel beschriebene Klassifikation von Eisenbahnweichen mit einem Modell gestützt werden, dass eindeutige Rückschlüsse über den Fahrweg ermöglicht. Bei der Sprachsignalverarbeitung, aber auch im Bereich der Ortung von Kraftfahrzeugen [37], werden zur Statistischen Modellierung oftmals Hidden-Markov-Modelle (HMMs) erfolgreich eingesetzt. Im Eisenbahnbereich wird von solchen Modellen auch zur Klassifikation von Defekten in der Schiene Gebrauch gemacht [6].

In den folgenden Abschnitten wird zunächst auf die Streckenkarte als Modell der Infrastruktur eingegangen. Aus den unterschiedlichen Varianten wird eine einfache, aber ausreichende Möglichkeit zur Modellierung näher erläutert, welche insbesondere an die im vorigen Kapitel dargestellte Weichenklassifikation zur Identifizierung von Ereignissen angepasst ist. Die Klassifikation zur Gewinnung einer Ortsinformation wird abschließend mit einem HMM dargelegt, welches als Bindeglied zwischen dem Modell, d. h. der Streckenkarte, und der Sensorik verstanden werden kann.

4.1 Digitale Streckenkarte und Ereignisse

Ein wesentlicher Teil der Schnittstelle zwischen Sensorik einerseits und Ortsinformation als Zielgröße andererseits ist die digitale Streckenkarte. Da bei schienengebundenen Fahrzeugen – im Gegensatz zum Automobil – der Fahrweg eine sehr eingeschränkte Anzahl an Freiheitsgraden besitzt, lässt sich dieser mit relativ einfachen Ansätzen modellieren. Kern der Modellierung ist dabei die digitale Streckenkarte, welche die Information über die vorhandene Infrastruktur repräsentiert.

tiert. Ziel ist die Zuordnung der Positionsinformation zu möglichen Zuständen, d. h. Orten des realen Fahrzeugs und damit die Gewinnung einer Ortsinformation. Die digitale Karte dient also als Schnittstelle zwischen relativer Positions- und absoluter Ortsinformation. Hierbei soll das vorhandene apriori-Wissen eine präzise und plausible Ortung gewährleisten. Daneben lassen sich Sensoren mit einem integrativen Messprinzip an Referenzpunkten wieder synchronisieren, um damit eine Drift der Messungen zu verringern. Aber auch wenn bereits absolute Positionsinformationen vorliegen, wie im Fall von GPS-Daten und Ortsbaken, müssen diese mitunter in Relation zueinander gebracht werden. Eine digitale Karte kann dann z. B. zur Zuordnung von Positionsdaten zu einem Fahrweg dienen.

Unter einer digitalen Streckenkarte versteht man gespeicherte Ortsinformationen, welche strukturiert digital vorliegen und somit von einem Rechner aus abgerufen und verarbeitet werden können. Digitale Streckenkarten können unterschiedlichste Informationen enthalten, je nachdem in welcher Umgebung sie eingesetzt werden sollen. Auch die Struktur unterscheidet sich je nach Anwendungsfall. Dennoch lassen sich viele allgemeine Zusammenhänge erkennen, so dass sich alle Streckenkarten auf einige wenige Grundtypen zurückführen lassen.

In einer digitalen Karte sollen alle wesentlichen und unveränderlichen Informationen der jeweiligen Strecke abgespeichert sein, sofern sie für die Ortung relevant sind. Dies können z. B. die Lage aller Weichen und Kreuzungen oder die Position anderer charakteristischer Punkte an der Strecke sein. Die Entfernungen zwischen den Referenzpunkten müssen bekannt sein, um Ereignisse vorhersagen zu können. Erforderlich zur Erstellung einer solchen Karte ist eine detaillierte Kenntnis über vorhandene Gleise und mögliche Fahrstraßen. Somit ist ein Zugang zu Infrastrukturdaten unerlässlich; gegebenenfalls können auch Daten durch Messfahrten akquiriert und in die Datenbank integriert werden. Ein Beispiel ist der mittlere Schwellenabstand \bar{x}_{cl} , welcher als Parameter zur in Abschnitt 2.4 beschriebenen Geschwindigkeitsmessung mittels Frequenzanalyse benötigt wird.

Die wichtigsten Anforderungen an eine digitale Streckenkarte sind dabei [53]:

- Externe Zugriffsmöglichkeiten
- Erweiterbarkeit
- Versionskontrolle und Versionsupdate
- Wartbarkeit
- Prüfbarkeit
- Vollständigkeit, Zuverlässigkeit und Fehlerfreiheit

Im folgenden wird auf die Konzepte zur Erstellung einer solchen Karte detaillierter eingegangen, um sie auf ihre Eignung zur Ortung mit Wirbelstrom-Sensoren zu untersuchen.

4.1.1 Erfassung und Wiedergabe der Netztopologie

Sinn und Zweck der digitalen Karte ist die Repräsentation von Wissen über die reale Umwelt. Man unterscheidet dabei unterschiedliche Typen von Streckenkarten und wählt zweckmäßigerweise eine den Messmöglichkeiten und den örtlichen Anforderungen angepasste Form. Soll z. B. lediglich eine möglicherweise driftbehaftete Wegmessung synchronisiert oder rekali­briert werden, genügt eine einfache lineare Karte. Je mehr unterschiedliche Ereignisse detektiert werden können, desto komplexer müssen entsprechende verwendete Streckeninformationen sein [26], um den Fahrweg auch in einer Netztopologie verfolgen zu können. Bei der Verwendung geometrischer Positions­information ist auch eine geometrische Karte vonnöten. Die einzelnen Formen werden in den folgenden Unterabschnitten kurz skizziert.

4.1.1.1 Einfache Ereignisfolge (lineare Karte)

Die lineare Karte ist die einfachste Variante einer digitalen Streckenkarte. Es ist nur ein Freiheitsgrad (Bewegung in einer Richtung) vorhanden, somit ist zum Auswerten der Informationen aus der digitalen Karte lediglich eine Wegmessung erforderlich. Alle Referenzpunkte sind, wie in Abb. 4.1 zu sehen, als Ereignisse mit entsprechenden Entfernungsdaten hinterlegt. Dies können z. B. Ortsmarkierungen (Baken) am Fahrweg sein, aber auch Haltestellen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), an denen das Fahrzeug anhält und die Türen öffnet. Im gezeigten Beispiel handelt es sich um die befahrenen Weichen.

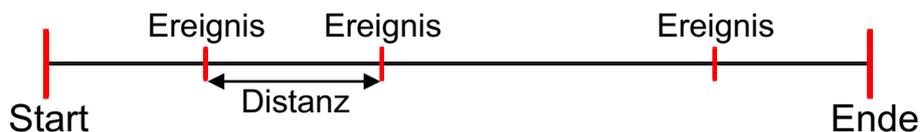


Abbildung 4.1: Lineare Streckenkarte.

Da nur eine Dimension als Freiheitsgrad verfügbar ist, eignet sich diese einfache digitale Streckenkarte sehr gut für die Anwendung im Schienenverkehr. Allerdings muss die gefahrene Strecke genau bekannt sein. Ein Abweichen von der geplanten Route ist nicht erlaubt, da in diesem Fall eine kartenunterstützte Ortung

nicht mehr möglich wäre. Zur absoluten Positionsmessung könnte in diesem Fall aber z. B. auf ein satellitenbasiertes System zurückgegriffen werden.

An einem einfachen Beispiel in Abb. 4.2 wird die Netzverfolgung (engl. *network following*) gezeigt. Vorhanden ist eine lineare Karte, in der zwei Ereignisse mit ihrer vorab bekannten Sollposition gespeichert sind. Um diese Sollposition herum wird dann jeweils ein Fangbereich gelegt, in welchem die Position einem Ereignis zugeordnet und die Wegmessung auf dessen Sollposition synchronisiert wird (a). Die Wegmessung des Fahrzeugs sei schlecht kalibriert, was zu einer Abweichung der Wegmessung vom wahren Wert (b) führt.

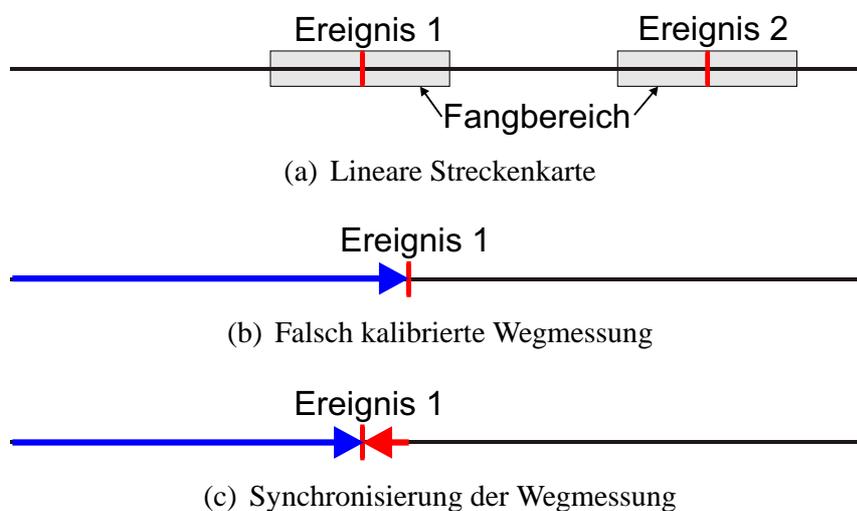


Abbildung 4.2: Synchronisierung der Wegmessung mit einer linearen Streckenkarte.

Bei Detektion von Ereignis 1 kann die Wegmessung dann wieder auf die Sollposition synchronisiert und damit auf den wahren Wert zurückgesetzt werden (c). Die Wegmessung kann dabei auch neu kalibriert werden, z. B. indem bei einem Radumdrehungszähler der Raddurchmesser angepasst wird.

4.1.1.2 Topologische Karte

Die einfachste Variante ist eine Wiedergabe der reinen Netztopologie, welche die erlaubten Fahrmöglichkeiten und Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen beinhaltet, durch einen Graphen, d. h. ein Knoten-Kanten-Modell [33]. In dieser Modellierung werden die Verzweigungsmöglichkeiten an Weichen durch Knoten und die Verbindungen durch Kanten wiedergegeben. Die Kanten entsprechen der im vorigen Abschnitt beschriebenen linearen Karte. Ein Beispiel ist in Abb. 4.3 dargestellt.

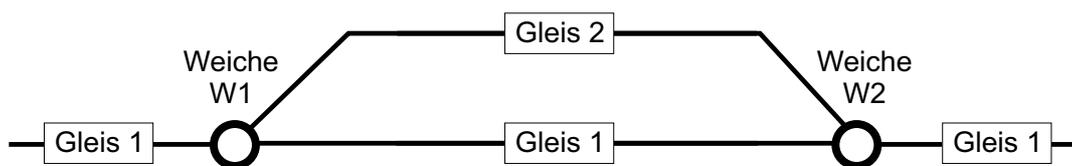


Abbildung 4.3: Ausschnitt aus einer topologischen Streckenkarte.

Zu jeder Gleiskante können weitere Merkmale, wie z. B. Gleisnummerierung, Streckenkilometrierung etc., ergänzt werden, so dass die Position der Gleiskante im Netz eindeutig festgelegt ist. Durch die Erweiterung auf mehrere zusammenhängende Strecken mit verschiedenen Abzweigmöglichkeiten kann nun auch ein Verlassen des ursprünglich geplanten Fahrwegs nachvollzogen werden, sofern alle Fahrmöglichkeiten hinterlegt sind. Bei einem kleineren Schienenverkehrsnetz gestaltet sich dies im allgemeinen noch recht übersichtlich.

In Abb. 4.4 sind die verschiedenen Möglichkeiten für einen Knoten skizziert. Neben Weichen können dies auch Gleisenden oder Anschlussknoten sein. Des weiteren kann die Befahrbarkeit einer Weiche eingeschränkt sein, wenn es sich z. B. um eine Rückfallweiche¹ handelt, welche eine definierte Vorzugslage hat.

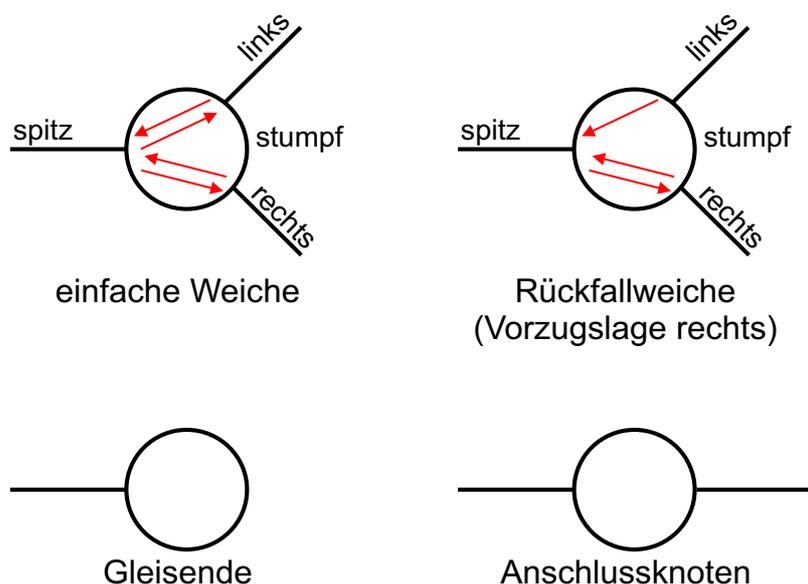


Abbildung 4.4: Mögliche Arten von Knoten in der topologischen Karte.

Die topologische Karte bietet die Möglichkeit, eine nicht vorher geplante Fahrt

¹Eine Rückfallweiche stellt sich selbsttätig in ihre definierte Vorzugslage – entweder links oder rechts – zurück, wenn sie stumpf nicht aus der Vorzugslage befahren wurde. Sie kann stumpf von beiden Richtungen, spitz jedoch nur in Richtung der Vorzugslage befahren werden. Rückfallweichen werden in der Regel nur bei Nebenbahnen mit einfachen Betriebsverhältnissen verwendet.

auf dem Netz nachzuvollziehen, sofern eine Sensorik zur Richtungsentscheidung vorhanden ist. Damit lassen sich alle möglichen Ereignisabfolgen anhand der in der Karte hinterlegten Netztopologie gewinnen. Hierbei ist allerdings eine wichtige Voraussetzung, dass die Daten in der Karte richtig und konsistent sind.

Im folgenden werden anhand eines kleinen Beispiels die Möglichkeiten des Map-Matchings mit einer topologischen Karte gezeigt. Eine wichtige Voraussetzung ist eine Sensorik, welche befahrene Weichen sicher erkennt, so dass der Fahrweg eindeutig nachvollzogen werden kann.

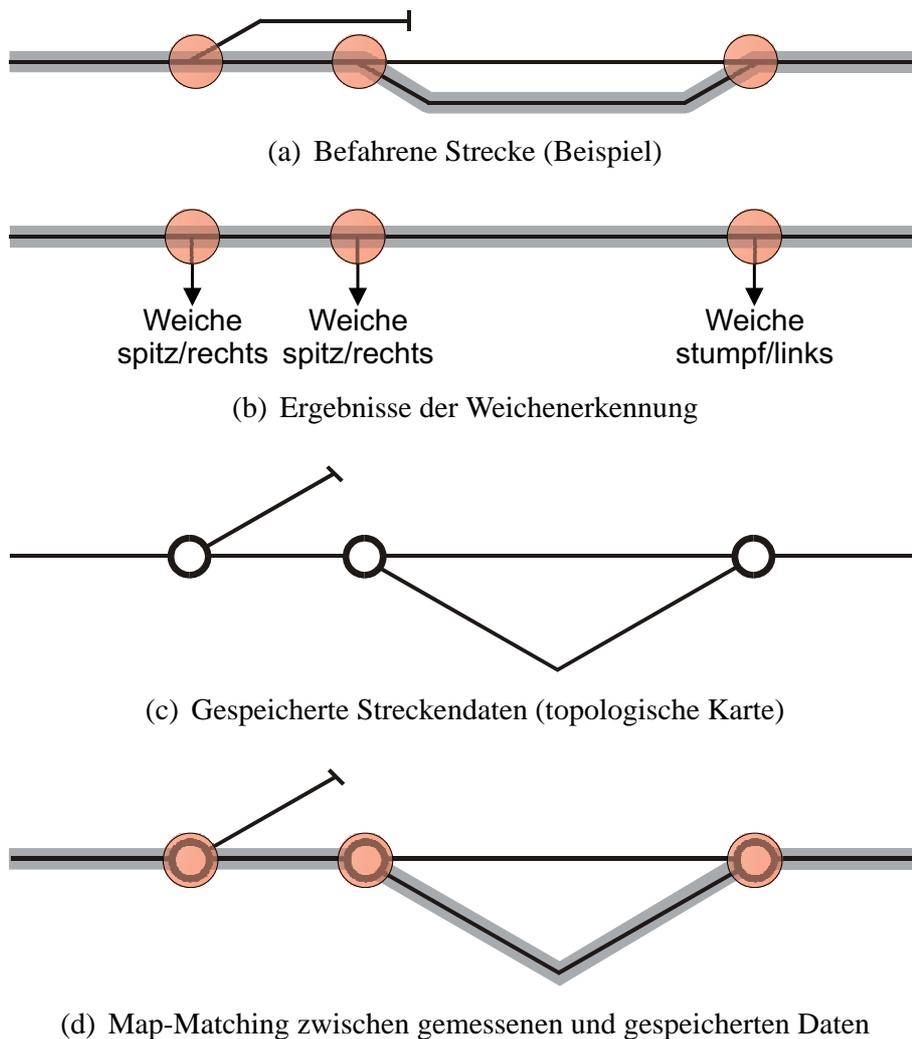


Abbildung 4.5: Map-Matching mit einer topologischen Streckenkarte.

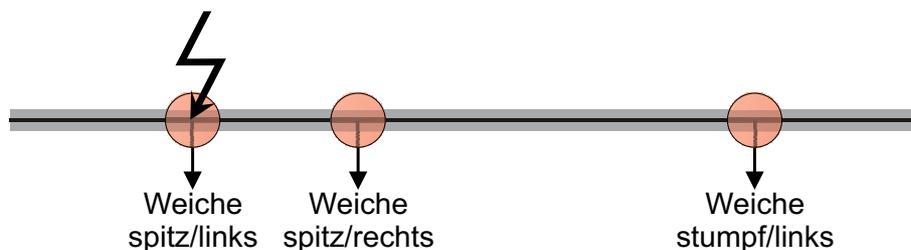
In dem in Abb. 4.5 gezeigten Beispiel wird ein kleiner Bahnhof befahren. Wie in Kapitel 3 dargelegt, misst die Wirbelstrom-Sensorik zum einen die zurückgelegte Wegstrecke (a) und liefert zum anderen mithilfe Weichenerkennung Position und Stellung aller befahrenen Weichen (b), in diesem Fall zwei spitz nach rechts befahrene Weichen und eine stumpf von links befahrene Weiche. Aus einem Ver-

gleich mit den in der digitalen Karte gespeicherten topologischen Infrastrukturinformationen (c) kann die gefahrene Strecke exakt nachvollzogen werden (d). Zudem lassen sich auch Messunsicherheiten der Odometrie durch die Synchronisation an Referenzpunkten wieder ausgleichen.

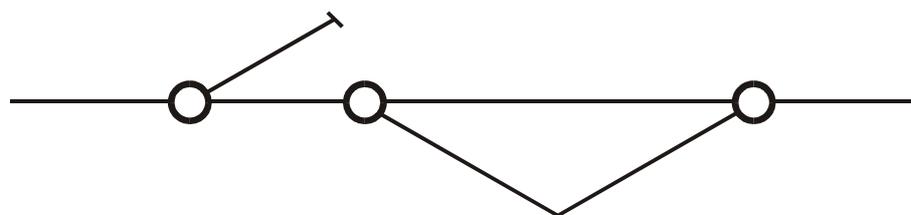
Ein interessanter Aspekt des Map-Matchings ist die Möglichkeit zur Sensor-Selbstüberwachung und Fehlerkorrektur. Sobald sich Messdaten nicht mit den Daten aus der digitalen Karte in Übereinstimmung bringen lassen, liegt auf jeden Fall ein Fehler vor. Entweder wurde eine Weiche falsch detektiert bzw. klassifiziert, was aufgrund des Klassifikationsprinzips eher unwahrscheinlich ist, oder die Daten in der digitalen Karte sind nicht mehr auf dem aktuellen Stand.



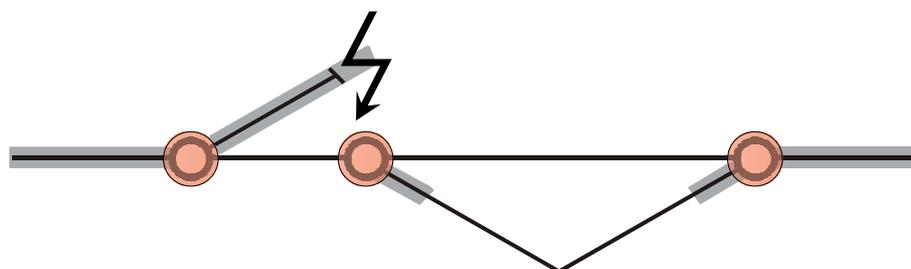
(a) Befahrene Strecke (Beispiel)



(b) (falsches) Ergebnis der Weichenerkennung



(c) Gespeicherte Streckendaten (topologische Karte)



(d) Diskriminierung des Fehlers bei der Weichenerkennung, Map-Matching und Erkennung des korrekten Fahrwegs

Abbildung 4.6: Fehlererkennung und -korrektur beim Map-Matching.

In dem in Abb. 4.6 gezeigten Beispiel wird die Stellung der ersten befahrenen Weiche falsch detektiert (b). Das Messsystem geht in diesem Fall davon aus, dass die Weiche nach links befahren wurde. Die folgende Messung detektiert eine Weiche, die laut digitaler Karte nicht erscheinen sollte. In diesem Moment wird die Fehlmessung erkannt (d). Durch einen Rücksprung des Klassifikators auf die letzte sichere Entscheidung wird das Map-Matching erneut eingeleitet. Beim Passieren der folgenden Weiche kann sich das System wieder auf den korrekten Fahrweg einstellen.

4.1.1.3 Erweiterte topologische Karte

Da die Wirbelstrom-Sensorik, anders als z. B. Inertialsensoren, keine zweidimensionalen geometrischen Eigenschaften des Fahrwegs, wie z. B. Kurvenradien, erfasst, ist eine topologische Streckenkarte zur Ortung ausreichend. Allerdings muss für die Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen bzw. Weichenbauteilen das Knoten-Kanten-Modell der topologischen Streckenkarte dahingehend erweitert werden, dass Eisenbahnweichen nicht mehr als null-dimensionale Knoten, sondern als räumlich ausgedehnte Elemente modelliert werden. Der Weichenanfang wird als Verzweigungsmöglichkeit durch einen Knoten dargestellt, und die Weichenbauteile werden räumlich ausgedehnt durch Kanten repräsentiert. Identisch zu Gleiskanten können auch hier Merkmale, wie z. B. Entfernung, Bauteillänge etc. zu jedem Weichenbauteil abgespeichert werden. Als Bezugspunkt dient in der vorliegenden Arbeit bei jeder Weiche der Weichenanfang. Alle Weichenbauteile werden mit ihrer Entfernung zu diesem Bezugspunkt referenziert. Die Verbindung zwischen den Weichenbauteilen und das Weichenende werden durch Knoten modelliert. Abbildung 4.7 zeigt die Knoten-Kanten-Modellierung einer Eisenbahnweiche zur Klassifikation mit der Wirbelstrom-Sensorik als Erweiterung der topologischen Streckenkarte.

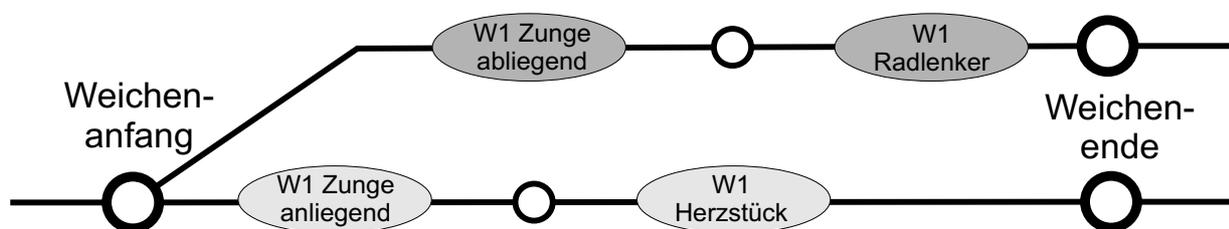


Abbildung 4.7: Repräsentation einer Eisenbahnweiche zur Klassifikation mit der Wirbelstrom-Sensorik als Erweiterung der topologischen Streckenkarte.

Befährt nun ein Zug einen bestimmten Fahrweg, so kann mithilfe der topologischen Karte genau festgestellt werden, welche Ereignisse zu erwarten sind. Da

der Fahrweg mitunter nicht im voraus bekannt ist, kann eine Abfolge von detektierten Ereignissen einem oder auch mehreren Fahrwegen zugeordnet werden. Hier zeigt sich, dass zur exakten, gleisgenauen Ortung geeignete, sich bei alternativen Fahrwegen unterscheidende Ereignisse auszuwählen sind. Würde man z. B. versuchen, Weichen und Fahrwege mittels einer Messung der Fahrzeug-Querbewegung zu erkennen, sind ausreichend große Unterschiede in den Bogenradien der einzelnen Fahrwege erforderlich. Für die Wirbelstrom-Sensorik genügen als Unterscheidungsmerkmal, wie in Kapitel 3 gezeigt, die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften der einzelnen Bauteile der Weiche.

4.1.1.4 Geometrische Karte

Bei einer geometrischen Karte werden sämtliche Informationen über den Verkehrsweg abgespeichert, wie z. B. Radien, Bögen und Geradenlängen. Somit lässt sich die gefahrene Strecke exakt nachvollziehen und kontinuierlich auswerten. Als Referenzpunkte dienen wiederum bekannte Positionen von Bauteilen. Das gezeigte Beispiel als geometrische Streckenkarte ist in Abb. 4.8 dargestellt.

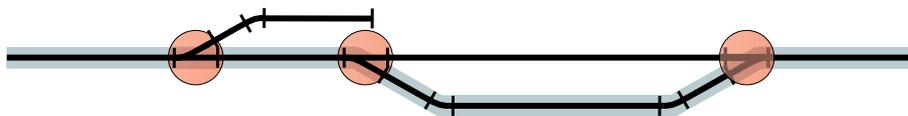


Abbildung 4.8: Geometrische Streckenkarte.

Für eine möglichst präzise Ortung ist eine entsprechend detaillierte Modellierung der Strecke (Geradenstück, Bogen bzw. Kreissegment, Übergangsbogen, Weiche) erforderlich. Allerdings ist die Datenmenge noch einigermaßen überschaubar, da die Strecke aus einfachen geometrischen Bauteilen zusammengesetzt wird.

4.1.1.5 Topographische Karte

Die topographische Streckenkarte entspricht im wesentlichen der geometrischen, enthält jedoch zusätzliche Informationen. Hinterlegt sind z. B. die Standorte von Signalen, Abschnitte im Tunnel oder sonstige besondere Gegebenheiten.

Entsprechend der verfügbaren Sensorik können prinzipiell beliebig viele zusätzliche Informationen als Referenzpunkte zur Ortung herangezogen werden. Im folgenden Abschnitt wird im Hinblick auf die Eigenschaften der verwendeten Wirbelstrom-Sensorik eine sinnvolle Auswahl eines Kartenmodells und von für die Ortung relevanten Ereignissen getroffen.

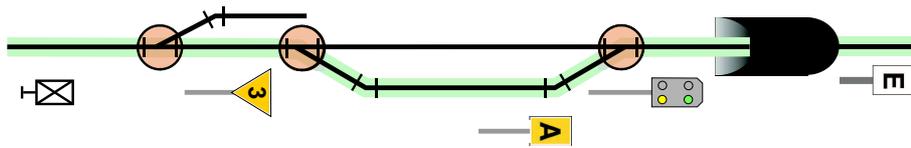


Abbildung 4.9: Topographische Streckenkarte.

4.1.2 Auswahl geeigneter Ereignisse zur Lokalisierung

Sinnvoll festgelegte Referenzpunkte sind das Grundgerüst jeder Streckenkarte. Erst die Lokalisierung solcher Punkte erlaubt die absolute Zuordnung einer Position zu einem Punkt in der Karte. Damit solche Punkte sicher wiedergefunden werden können, müssen sie entsprechend streckenseitig eindeutig markiert werden. Im allgemeinen geschieht dies durch Ortsbaken, die z. B. mittels Infrarot-Datenübertragung eine Kennung an das vorbeifahrende Fahrzeug zurückgeben. Diese Ortsbaken können sich im Gleisbereich oder auch in der Nähe des Gleises befinden. Solche Systeme sind für Betriebsleitsysteme bei Straßenbahnen und Bussen bereits vielfach im Einsatz.

Beim ETCS werden Balisen eingesetzt, welche ebenfalls eine Standortinformation an ein vorbeifahrendes Fahrzeug übertragen können. Daneben können auch weitere Meldungen, z. B. Bremsbefehle vor oder an einem haltzeigenden Signal, an das Fahrzeug übermittelt werden.

Weitere Referenzpunkte können auch die an der Strecke verbauten Teile des Gleises sein. Insbesondere im Hinblick auf die Nutzung in einer topologischen Streckenkarte sind die Weichen besonders interessant, da diese als Abzweige ohnehin in der Karte verzeichnet sein müssen. Nach jeder Weiche müsste eine Bake die Information über das befahrene Gleis übermitteln, um eine gleisselektive Ortung sicherzustellen. Die Wirbelstrom-Sensorik kann Weichen anhand ihrer Bauteile detektieren und klassifizieren, wie in Abschnitt 3.4.10 gezeigt wurde. Die Umsetzung dieser Information im Hinblick auf die statistische Modellierung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.2 Realisierung einer topologischen Streckenkarte

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde eine einfache topologische Streckenkarte der Infrastruktur der Versuchsstrecke auf der *Albtalbahn* erstellt. Kern der Informationen des im wesentlichen in Abschnitt 4.1.1.2 vorgestellten topologischen Kartentyps sind die vorhandenen Weichen. Gleise können nur an Weichen mit-

einander verknüpft sein, so dass durch Registrierung aller Weichen sämtliche Fahrmöglichkeiten gespeichert werden können. Zunächst muss jeder Weiche eine eindeutige ID zugewiesen werden, damit entspricht allein die entsprechende ID einer eindeutigen Ortsinformation. Die eigentlichen Fahrmöglichkeiten werden dann in den Verknüpfungen der Weichen untereinander repräsentiert.

4.2.1 Netztopologie und Nummerierung der Weichen

Bei der Verteilung von IDs auf die in der topologischen Karte zu erfassenden Weichen wäre selbstverständlich eine einfache durchlaufende Nummerierung möglich; jedoch sind die bei der Eisenbahn vorhandenen Weichen in der Regel bereits nummeriert, wobei eine Nummer pro Bahnhof nur einmal vorkommen darf. Daher erscheint es sinnvoll, die Weichen-IDs entsprechend nach Bahnhöfen zu gruppieren. Für das Netz der *Albtalbahn* wurde das folgende, an der bestehenden Nummerierung orientierte Schema verwendet:

Tabelle 4.1: Sinnvolles Nummerierungsschema für Eisenbahnweichen.

ID-Gruppe	Bedeutung	Ziffern	Beispiel
L	Bereichs-ID	1	1 = Albtal
BB	Bahnhofs-ID	2	09 = Herrenalb
WWW	Weichen-ID	3	030 = Weiche 3
O	Orientierung	1	1 = spitz/links
T	ggf. Bauteil	1	1 = Herzstück

Bei diesem Nummerierungsschema kann so z. B. der Weichen-ID 109030 die Weiche 3 im Bahnhof Herrenalb (Bereich Albtal) zugeordnet werden. Zusätzlich kann der Weichen-ID ein Suffix angehängt werden, welches Information über Befahrerichtung, Weichenstellung und ggf. zugehörige Bauteile beinhaltet

Tabelle 4.2: Befahrerichtung, Weichenstellung und Bauteile können durch ein entsprechendes Suffix der Weichen-ID gekennzeichnet werden.

Ziffer	Weichenstellung	Bauteil
0	spitz/rechts	(unbekanntes Bauteil)
1	spitz/links	Herzstück
2	stumpf/rechts	Radlenker
3	stumpf/links	Zungenanfang (anl. Weichenzunge)
4	-	Zungenspitze (anl. Weichenzunge)
5	-	abliegende Weichenzunge

So kennzeichnet z. B. das Suffix 12 dass eine nach links gestellte Weiche spitz befahren wurde und der Radlenker dieser Weiche klassifiziert wurde.

4.2.2 Realisierung der Weichen-Referenzdatenbank

Um die Netztopologie abbilden zu können, müssen die Weichen untereinander entsprechend der Fahrmöglichkeiten verknüpft werden. Eine Weiche erhält somit folgende Eigenschaften zugewiesen:

- ID
- Weichentyp
- Nachbarn (nächste Weichen), jeweils mit Entfernungsangabe
 - ID0: Weichenspitze
 - ID1: rechts
 - ID2: links
 - ID3: gerade/mitte (bei Dreiwegeweichen)
- Position (topologisch, in Strecken-km)

Die Weichen-ID erlaubt eine im Netz eindeutige Zuordnung der Weiche; der Weichentyp ist die Bezeichnung für die Geometrie der Weiche (z. B. EW 49-300-1:9). Die Nachbarn sind die an diese Weiche anschließenden Weichen, welche die Knoten in der digitalen Karte repräsentieren. Die Position gibt die Lage der Weiche und ihre absolute Position in Strecken-km an. Diese Attribute können z. B. um eine geometrische Positionsinformation ergänzt werden.

Analog zu den beim ETCS von den Eurobalisen an das Fahrzeug übermittelten Daten werden auch Informationen über die benachbarten, d. h. die nächsten zu erwartenden Weichen gespeichert. Dies erlaubt eine wie in Abschnitt 4.4.3 beschriebene Nutzung als apriori-Wissen für die Klassifikation.

4.3 Klassifikation mit einfachen Markov-Ketten

In den folgenden Abschnitten wird anhand von ausgewählten Beispielen gezeigt, dass die Modellierung der Umgebung eine wichtige Voraussetzung für die richtige Ortung ist. Begonnen wird mit dem recht einfachen Modell einer eindimensionalen Karte bis hin zu komplexeren Modellen, welche zwar mehr Möglichkeiten bieten, allerdings auch schwerer zu handhaben sind.

4.3.1 Theoretische Betrachtungen

Die an der Strecke erwarteten Ereignisse liegen, da der Zug den spurgeführten Fahrweg nicht verlassen kann, als fest vorgegebene Abfolge vor, sofern eine richtig erstellte und aktuelle Streckenkarte verfügbar ist. Die bei mehreren parallel führenden Gleisen möglichen unterschiedlichen Fahrwege können dabei anhand der jeweiligen Abfolge voneinander unterschieden werden. Diese diskreten Ereignisabfolgen lassen sich elegant mit Markov-Ketten modellieren. Die Wahrscheinlichkeiten $P(E_i)$ der Ereignisse E_i bedingen sich dabei aufgrund ihrer Position in der Markov-Kette und hängen nur vom jeweils letzten Zustand $t - 1$, nicht jedoch von vorvergangenen Zuständen ab (Markov-Kette 1. Ordnung):

$$P(E_t|E_1, E_2 \dots E_{t-1}) = P(E_t|E_{t-1}). \quad (4.1)$$

Abbildung 4.10 veranschaulicht die Anwendbarkeit von Markov-Ketten für die Modellierung von spurgebundenem Verkehr. Alle Ereignisse im Fahrweg werden wie in einer Kette nacheinander durchlaufen.

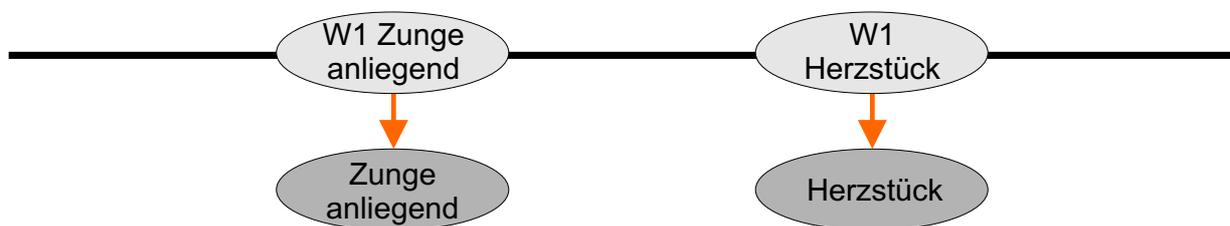


Abbildung 4.10: Beispiel für eine Ereigniskette beim Befahren einer Eisenbahnweiche.

Auf eine Schienenstrecke angewendet hat ein Übergang von einem Ereignis zum nächsten bei der einfachsten Modellierung immer die Wahrscheinlichkeit eins, da auf einer Gleiskante die Ereignisabfolge aus der digitalen Karte bekannt ist. Somit folgt nach einem Ereignis zwingend das nächste zu erwartende Ereignis. An einer Weiche, die zwei Fahrmöglichkeiten bietet, ist die Übergangswahrscheinlichkeit in jeden Strang 0,5, sofern keine Informationen über bevorzugte Fahrwege vorliegen. Bei Weichen mit Vorzugslage, wie Handweichen oder Rückfallweichen, können die Übergangswahrscheinlichkeiten entsprechend richtungsabhängig null bzw. eins sein. Somit lässt sich aus einer detektierten Abfolge von ausgegebenen Ereignissen der gefahrene Weg eindeutig rekonstruieren. Die jeweils bedingten Wahrscheinlichkeiten können mit einer Markov-Kette, welche in Abb. 4.11 skizziert ist, modelliert werden. Grundlage für die Modellierung ist hier die erweiterte topologische Streckenkarte, welche in Abschnitt 4.1.1.3 beschrieben wurde.

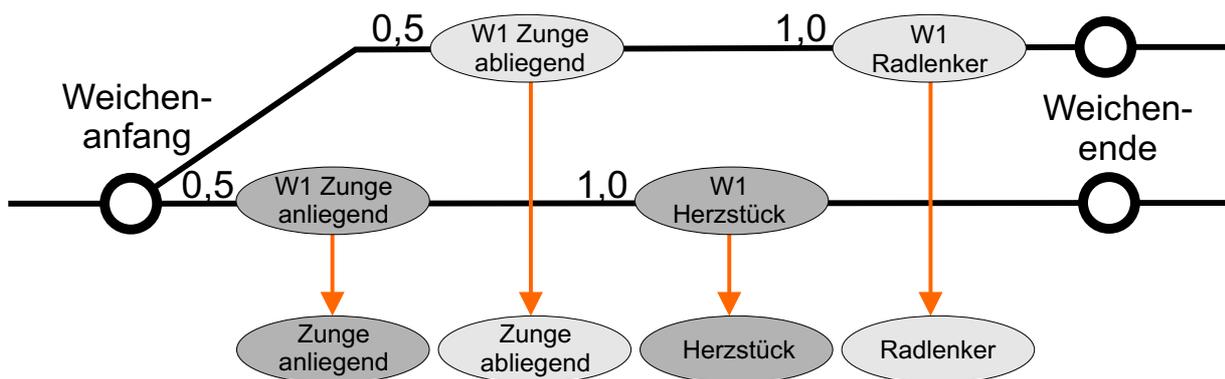


Abbildung 4.11: Modellierung der Ereignisse beim Befahren einer Eisenbahnweiche mit einer Markov-Kette.

Die Gesamtwahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeiten, wobei die Berechnung aufgrund der Markov-Eigenschaft rekursiv erfolgen kann. Dies wird im folgenden Abschnitt gezeigt.

4.3.2 Rekursive Klassifikation mit Markov-Modellen

Die Klassifikation mit Markov-Modellen erfolgt rekursiv und gliedert sich in drei Schritte:

1. Initialisierung

Sprung in der Karte zur ersten klassifizierten Weiche mit einer entsprechenden Startwahrscheinlichkeit.

2. Rekursion

Der Fahrweg wird innerhalb der Karte mit jeder weiteren Klassifikation weiterverfolgt; die Wahrscheinlichkeiten werden multipliziert.

3. Rekursionsabschluss

Die Gesamtwahrscheinlichkeit für eine Position ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeiten.

Wie aus den in Abschnitt 3.4.10 gezeigten Klassifikationsergebnissen hervorgeht, kann der wahre Zustand eines Systems offensichtlich nicht immer sicher erkannt werden. Die Beobachtung der Zustände erfolgt nur indirekt über klassifizierte Ereignisse. Ein Modell zur Erfassung solcher hieraus resultierender statistischer Unsicherheiten wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.4 Klassifikation mit Hidden-Markov-Modellen

Die Wahrscheinlichkeit, mit der bei einem Ereignis eine entsprechende Ausgabe des Klassifikators erfolgt, ist nicht zwangsläufig eins. Da die Zuverlässigkeit der Klassifikation vom jeweiligen Ereignis abhängig ist, sollte dies im Modell berücksichtigt werden. Das Hidden-Markov-Modell (HMM) erlaubt genau diese Modellierung, indem die wahren Ereignisse E_k als verdeckt (engl. *hidden*), d. h. nicht direkt beobachtbar angesehen werden und nur die Ausgabe eines Ereignisses O_k beobachtet werden kann. Hierbei spielen die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Ereignis und dessen Ausgabe, im folgenden Ausgabewahrscheinlichkeiten genannt, eine wichtige Rolle. Um diese zu modellieren, ist einerseits analytisches Wissen über die Möglichkeiten der Klassifikation, andererseits empirisches Wissen über das reale Verhalten des Klassifikators erforderlich.

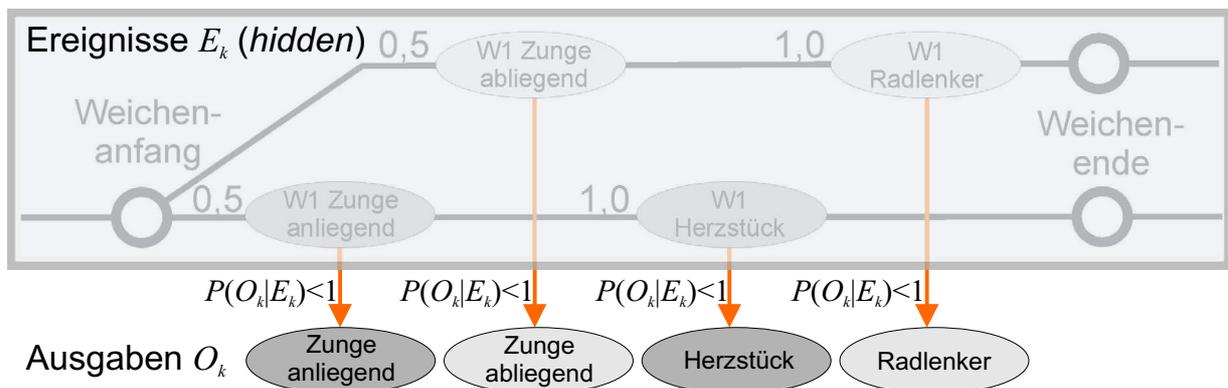


Abbildung 4.12: Modellierung der nicht direkt beobachtbaren Ereignisse mit einem Hidden-Markov-Modell (HMM).

Grundlage der Hidden-Markov-Modelle ist, wie auch bei der in Abschnitt 3.4.8 beschriebenen Klassifikation, die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(E_k|O_k)$ für das Auftreten des Ereignisses E_k nach der Beobachtung der Ausgabe O_k entsprechend des Bayesschen Gesetzes:

$$P(E_k|O_k) = \frac{P(O_k|E_k) \cdot P(E_k)}{P(O_k)}. \quad (4.2)$$

Somit lassen sich aus der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(O_k|E_k)$ mithilfe der apriori-Wahrscheinlichkeit $P(E_k)$ die Abhängigkeiten in den Wahrscheinlichkeitsausdrücken umkehrt darstellen, wobei der Nennerterm $P(O_k)$ wiederum konstant ist und damit auf die Klassifikation keinen Einfluss hat. Es genügt also, $P(E_k|O_k)$ als abhängig von $P(O_k|E_k)$ und $P(E_k)$ zu betrachten. Die Ausgabewahrscheinlichkeit $P(O_k|E_k)$ lässt sich aus empirischen Daten gewinnen; in die

apriori-Wahrscheinlichkeit $P(E_k)$ geht das Vorwissen aus der digitalen Streckenkarte über die zu erwartenden Ereignisse ein.

In bezug auf die Weichenklassifikation bedeutet dies, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses, z. B. einer Weiche oder eines bestimmten Weichenbauteils, aus der Beobachtung, dem Vorabwissen aus der Streckenkarte und dem empirischen Wissen über die Güte der Klassifikation berechnen lässt. So kann z. B. Vorwissen über gleichartige Weichen, die normalerweise voneinander schlecht zu unterscheiden sind, in das Modell mit einbezogen werden.

Bei Messungen mit realen Daten kann sowohl der Schritt der Detektion als auch der der Klassifikation fehlschlagen. Im ersten Fall geht ein Ereignis verloren, so dass die Ereignisfolge in der Markov-Kette nicht mehr mit der in der digitalen Streckenkarte übereinstimmt. Für den Fall einer fehlgeschlagenen Klassifikation würde ein falsches Ereignis ausgegeben. Auch in diesem Fall reicht die einfache Markov-Kette als Modell nicht mehr aus. Daher ist eine Erweiterung des Modells erforderlich, so dass auch von der digitalen Karte abweichende Klassifikationsergebnisse verarbeitet werden können. Zu berücksichtigen wären dann falsch detektierte Ereignisse, nicht detektierte Ereignisse und detektierte, aber nicht wirklich vorhandene Ereignisse.

Eine sinnvolle Erweiterung ist außerdem die Einbeziehung der Ortskoordinaten der Ereignisse in die Klassifikation. Eine bekannte Weiche sollte stets an derselben Stelle zu detektieren sein. So kann z. B. der Wert der apriori-Wahrscheinlichkeit $P(E_k)$ abhängig von der Position modelliert werden. Die einfachste Annahme ist eine Gauß-Verteilung um die Sollposition. Eine örtliche Verschiebung deutet somit auf eine fehlerhafte Klassifikation oder auch eine veränderte Infrastruktur hin.

Wie in Abschnitt 4.3 gezeigt, ist die einfache Markov-Kette nicht immer in der Lage, die beobachteten Ereignisse korrekt denen aus dem Systemmodell der Infrastruktur zuzuordnen. Der Hauptgrund liegt in der Tatsache, dass die Signale als Produkt statistisch agierender Quellen zu betrachten sind. Aus einem Zustand lässt sich somit nicht automatisch eine bestimmte Ausgabe ableiten, sondern das Systemmodell muss um eine Ausgabewahrscheinlichkeit der Ereignisse erweitert werden. Damit wird ermöglicht, auch nicht sicher zu klassifizierende Ereignisse zu verarbeiten.

Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Hidden-Markov-Modellen, welche vor allem in der automatischen Spracherkennung verbreitet sind.

4.4.1 Theoretische Betrachtungen

Grundlage der HMMs ist ein zweistufiger stochastischer Prozess. In der ersten Stufe werden die möglichen diskreten Zustände des Modells durchlaufen, wobei – analog zur Markov-Kette 1. Ordnung – das Verhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt t nur vom unmittelbar vorausgehenden Zustand zum Zeitpunkt $t - 1$ abhängt:

$$P(E_t | E_1, E_2 \dots E_{t-1}) = P(E_t | E_{t-1}) \quad (4.3)$$

In der zweiten Stufe wird dann abhängig vom jeweiligen Zustand E_t eine Ausgabe O_t generiert, welche nur vom Zustand E_t und nicht von vergangenen Zuständen E_i oder Ausgaben O_i abhängt:

$$P(O_t | O_1 \dots O_{t-1}, E_1 \dots E_{t-1}, E_t) = P(O_t | E_t) \quad (4.4)$$

Da die wahren Zustände E_i nicht direkt beobachtet werden können, werden sie als verdeckt betrachtet; nur die Ausgaben O_i lassen Schlussfolgerungen auf den wahren Zustand zu.

Im vorliegenden Fall wird ein Hidden-Markov-Modell 1. Ordnung verwendet, welches man üblicherweise mit λ bezeichnet. Dieses wird im folgenden vollständig beschrieben:

- Es gibt eine endliche Menge von Zuständen $\{e | 1 \leq E \leq N\}$, welche eingenommen werden können. Dies sind alle relevanten Ereignisse, die im Gleisbereich detektierbar sind, wobei aufgrund der Art der Sensorsignale des Wirbelstrom-Sensors und der Anforderungen an eine gleisselektive Ortung eine Eingrenzung auf Weichen und Weichenbauteile sinnvoll ist.
- Eine Matrix \mathbf{A} beschreibt die Übergangswahrscheinlichkeiten (apriori-Wahrscheinlichkeiten) zwischen den einzelnen Zuständen.

$$\mathbf{A} = \{a_{ij} | a_{ij} = P(E_t = j | E_{t-1} = i)\} \quad (4.5)$$

In dieser Matrix werden die möglichen Übergänge zwischen zwei Zuständen eingetragen. a_{ij} ist größer 0, sofern ein Übergang möglich ist. Falls kein Übergang erlaubt werden soll, wird a_{ij} gleich 0. In diese Matrix gehen die Informationen aus der topologischen Streckenkarte ein.

- Ein Vektor π beinhaltet die jeweilige Startwahrscheinlichkeit jedes Zustands.

$$\pi = \{\pi_i | \pi_i = P(E_1 = i)\} \quad (4.6)$$

Falls kein Vorwissen über den zu erwartenden Startzustand vorliegt, setzt man $\pi_i = \frac{1}{N}$. Liegt hingegen ein wie bei der Eisenbahn für Zugfahrten unbedingt erforderlicher Fahrplan vor, so sollten die zum Startzeitpunkt dem geplanten Aufenthaltsort am nächsten gelegenen Weichen eine höhere a priori-Wahrscheinlichkeit erhalten, als sehr weit entfernt liegende. Zum Initialisieren kann auch die Positionsinformation aus einem GNSS-Sensor verwendet werden, indem die zur aktuellen Position nahen Weichen eine hohe, weiter entfernte Weichen hingegen eine niedrige Zustandsstartwahrscheinlichkeit erhalten.

- Die Matrix \mathbf{B} fasst die zustandsspezifischen Emissionswahrscheinlichkeiten zusammen:

$$\mathbf{B} = \{b_{jk} | b_{jk} = P(O_t = o_k | E_t = j)\} \quad (4.7)$$

Hier wurde ein diskretes HMM zur Modellierung gewählt, da die Ausgabe einer bestimmten Beobachtung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angegeben werden kann. Die Verteilungsfunktion muss dabei unimodal sein.

4.4.2 Systemkonzept

Für die Anwendung von HMMs zur Ortung im Schienenverkehr ist ein ereignisdiskretes Modell sinnvoll². Es liegt eine abzählbare Anzahl von detektierbaren Ereignissen, z. B. von Weichen, vor. Diese Ereignisse erscheinen nicht mit einer vorgegebenen zeitlichen oder örtlichen Frequenz. Der Übergang von einer Gleiskante der Streckenkarte auf die nächste wird dabei durch das Ereignis „Weiche befahren“ sozusagen auf einen bestimmten Zeitpunkt t getriggert. Damit sind die Zustände E_i auf die befahrenen Ereignisse festzulegen. Die Ausgabe von Beobachtungen O_i erfolgt durch die Weichenklassifikation.

4.4.2.1 Modellauswahl

Jeder mögliche Pfad in der digitalen Karte wird durch ein Modell λ_i repräsentiert. Dies kann z. B. eine aufgrund der Gleistopologie erlaubte Fahrstraße sein.

²Die Klassifikation mit einem zeitdiskreten Modell wäre ebenfalls sinnvoll, wenn Geschwindigkeits- oder Wegmessungen in bestimmten Zeitabständen erfolgen und daneben klassifizierte Ergebnisse ausgegeben werden. Der Übergang von einer Gleiskante auf die nächste würde z. B. durch die Ereignisse „Weglänge erreicht“ oder „Weiche befahren“ eingeleitet. Da in dem hier betrachteten Systemkonzept die Wegmessung nicht direkt berücksichtigt wird und die Übergänge von einer Gleiskante auf die nächste nur durch entsprechend klassifizierte Weichenereignisse erfolgen, wird nur das ereignisdiskrete Modell weiterverfolgt.

Ziel der Untersuchung ist es, genau den Pfad zu finden, welcher anhand der Beobachtungen der Ereignisse am wahrscheinlichsten ist.

Analog zur im Abschnitt 3.4.8 beschriebenen Bayes-Klassifikation soll ausgehend von einer bestimmten Beobachtung \mathbf{O} auf einen Zustand \mathbf{E} geschlossen werden, der durch das Modell λ abgebildet wird. Jedes Modell λ_i repräsentiert dabei eine Fahrstraße. Da stets mehrere Fahrstraßen möglich sind und damit mehrere Modelle zur Verfügung stehen, ist das Modell λ_i gesucht, welches die Beobachtung \mathbf{O} am besten wiedergibt:

$$\lambda_j = \arg \max_{\lambda_i} P(\lambda_i | \mathbf{O}). \quad (4.8)$$

Die Wahrscheinlichkeit $P(\lambda_i | \mathbf{O})$, dass ein Modell λ_i unter der Voraussetzung einer Beobachtung \mathbf{O} vorliegt, lässt sich mithilfe des Bayesschen Gesetzes ausdrücken als

$$P(\lambda_j | \mathbf{O}) = \max_i \frac{P(\mathbf{O} | \lambda_i) P(\lambda_i)}{P(\mathbf{O})}. \quad (4.9)$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (4.8) nach Anwendung des Bayesschen Gesetzes das wahrscheinlichste Modell

$$\lambda_j = \arg \max_{\lambda_i} \frac{P(\mathbf{O} | \lambda_i) P(\lambda_i)}{P(\mathbf{O})}. \quad (4.10)$$

Da die Wahrscheinlichkeit $P(\mathbf{O})$ konstant ist und somit nicht von λ_i abhängt, vereinfacht sich Gl. (4.10) zu

$$\lambda_j = \arg \max_{\lambda_i} P(\mathbf{O} | \lambda_i) P(\lambda_i). \quad (4.11)$$

In diesem Ausdruck repräsentiert $P(\lambda_i)$ die apriori-Wahrscheinlichkeit, dass eine im Modell λ_i vorhandene Zustandsfolge E_i eintritt. Hier geht das Vorwissen aus der digitalen Streckenkarte ein, sofern Informationen über die geschätzte Fahrzeugposition vorliegen. Sofern kein Vorwissen vorhanden ist, wird $P(\lambda_i)$ nicht berücksichtigt und zu eins gesetzt. Damit vereinfacht sich Gl. (4.11) weiter zu

$$\lambda_j = \arg \max_{\lambda_i} P(\mathbf{O} | \lambda_i). \quad (4.12)$$

Ein Verfahren zur Berechnung dieser Produktionswahrscheinlichkeit $P(\mathbf{O} | \lambda_i)$ wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.4.2.2 Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeit

Die Produktionswahrscheinlichkeit $P(\mathbf{O}|\lambda_i)$ ist eine zentrale Größe zur Bewertung eines Modells anhand von Messdaten. So müssen z. B. mehrere mögliche Routen im Gleisnetz voneinander unterschieden werden. Für die Verfolgung der Fahrtroute eines Schienenfahrzeugs im Netz erscheint der sogenannte *Forward-Algorithmus* [19] geeignet.

Zunächst wird eine *Vorwärtsvariable* $\alpha_t(i)$ definiert, welche alle vorangegangenen Beobachtungen O_i und den aktuellen Zustand $E_t = i$ bei gegebenem Modell λ enthält:

$$\alpha_t(i) = P(O_1, O_2, \dots, O_t, E_t = i | \lambda) \quad (4.13)$$

Der eigentliche *Forward-Algorithmus* gliedert sich in drei Schritte:

1. Die **Initialisierung** des Modells erfolgt bei der Startbeobachtung O_1 mit dem Produkt aus der Emissionswahrscheinlichkeit b_i und der Zustandsstartwahrscheinlichkeit π_i :

$$\alpha_1(i) := \pi_i b_i(O_1) \quad (4.14)$$

2. Die **Rekursion** wird für alle Ereignis-Zeitpunkte t von $t = 1$ bis $T - 1$ durchlaufen:

$$\alpha_{t+1}(j) := \sum_i \{\alpha_t(i) a_{ij}\} b_j(O_{t+1}) \quad (4.15)$$

Da an Eisenbahnweichen maximal drei Gleiskanten angrenzen, enthält die Summe in Gl. 4.15 maximal drei Elemente. Wird zusätzlich die Fahrtrichtung mit berücksichtigt, vereinfacht sich die Berechnung nochmals. Hier zeigt sich deutlich ein wesentlicher Systemvorteil der Eisenbahn mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Fahrwegen.

3. Im **Rekursionsabschluss** werden schließlich die Wahrscheinlichkeiten aller Vorwärtsvariablen für alle zum Zeitpunkt T möglichen N Zustände e_t , aus denen die Beobachtung \mathbf{O} generiert werden kann, aufsummiert:

$$P(\mathbf{O}|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i) \quad (4.16)$$

Aus dem *Forward-Algorithmus* abgewandelte Algorithmen, wie z. B. der *Viterby-Algorithmus* oder der sogenannte *Forward-Backward-Algorithmus*, können die Produktionswahrscheinlichkeiten mitunter wesentlich effizienter berechnen. Da bei dem hier verwendeten Modell der zugrundeliegende „Wortschatz“ aufgrund der relativ wenigen Fahrmöglichkeiten recht einfach ist, wird auf eine detailliertere Betrachtung möglicher Algorithmen verzichtet und auf entsprechende Fachliteratur verwiesen, z. B. [19, 59, 61]. Für die bei der *Albtalbahn* durchgeführten Versuche wurde der Einfachheit halber lediglich der *Forward-Algorithmus* verwendet. Auf ein Training der Modellparameter – in diesem Fall der Emissions- und Übergangswahrscheinlichkeiten – wurde ebenfalls verzichtet, da z. B. die Anzahl der Zustände durch die zu klassifizierenden Ereignisse festgelegt ist und die Emissionswahrscheinlichkeiten vorab aus Referenzmessungen abgeschätzt werden können.

Der in Abschnitt 3.4.8 beschriebene Bayes-Klassifikator liefert zu jeder zum Zeitpunkt t aus dem detektierten Signal \mathbf{s} beobachteten Klasse k zusätzlich eine Wahrscheinlichkeit $P(k|\mathbf{s})$, welche der Wahrscheinlichkeit $P(O_i=k)$ für eine bestimmte Beobachtung entspricht. Bei dem hier vorgestellten HMM kann man dies dazu nutzen, die Güte der Klassifikation in das Ergebnis einfließen zu lassen. Damit erhält man als Endergebnis die Wahrscheinlichkeit

$$P_{k_T}(\lambda, \mathbf{O}, \mathbf{s}_T) = P(\mathbf{O}|\lambda) \cdot P(O_T=k_T) = P(\mathbf{O}|\lambda) \cdot P(k_T|\mathbf{s}_T) \quad (4.17)$$

als Produkt aus der modellseitigen Produktionswahrscheinlichkeit $P(\mathbf{O}|\lambda)$ und der Beobachtungswahrscheinlichkeit $P(O_T=k_T)$ als Messgüte.

In der Regel wird, wie aus den Ergebnissen aus Abschnitt 3.4.10.1 ersichtlich ist, der Bayes-Klassifikator mehr als nur eine mögliche Weiche ausgeben. Insofern ist die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer möglicher Modelle sinnvoll.

4.4.2.3 Parallele Verfolgung mehrerer Modelle

Zur Ortung und Bestimmung der Position könnte man nun einfach, wie in Abschnitt 4.4.2.1 dargestellt, das Modell mit der höchsten Produktionswahrscheinlichkeit gemäß Abschnitt 4.4.2.2 verwenden. Dieses Verfahren wird im Falle von guten Klassifikationsergebnissen, d. h. bei denen eine Weiche mit hoher Wahrscheinlichkeit detektiert wird, stets sehr gut funktionieren. Es ist allerdings sinnvoller, insbesondere bei unsicheren Klassifikationsergebnissen mehrere Modelle über einige Schritte parallel zu betrachten. Ansonsten könnte sich die Fahrzeugposition möglicherweise sprunghaft verändern, sofern man dies nicht anhand des Wissens über die Netztopologie ausschließt. Allerdings wäre dann der wahre Pfad

nur durch eine erneute Initialisierung des Modells zu erreichen. Das Ziel der Verfolgung mehrerer Modelle (*Multihypothesentracking*) ist eine Verbesserung der Ortungsgüte, je mehr Informationen vorliegen – unabhängig von einzelnen unsicheren Klassifikationen.

Die Anzahl m der parallel verfolgten Modelle kann an die Güte der Klassifikation angepasst werden. Je eindeutiger die Klassifikation, desto niedriger kann die Zahl der Modelle werden, ohne dass Unstetigkeiten in der Positionsbestimmung auftreten. Liegen für eine Strecke überhaupt keine genauen Weichen-Referenzdaten vor, sollte die Zahl der Modelle entsprechend erhöht werden. Die auf der Versuchsstrecke erzielten Klassifikationsergebnisse beinhalteten selten mehr als zwei nahezu gleichwahrscheinliche Weichen, so dass eine Modellanzahl von $m=3$ durchaus als ausreichend erscheint. Da der Rechenaufwand bei der verwendeten topologischen Karte keine entscheidende Rolle spielt, können auch wesentlich mehr Modelle parallel betrachtet werden, wenn z. B. von einem Streckenabschnitt keine Weichen-Referenzdaten vorliegen.

Zur eigentlichen Ortung, also der Bestimmung der aktuellen Position anhand der klassifizierten Weichen, ist es erforderlich, schlechte Modelle nicht weiterzuverfolgen und außerdem ggf. neue Modelle zu initialisieren. Zur Auswahl sinnvoller Modelle hat sich folgender Algorithmus als geeignet gezeigt:

1. Die **Initialisierung** der Modelle erfolgt mit der Startbeobachtung O_1 , also mit der Klassifikation der ersten Weiche nach Start des Systems. Für *alle* möglichen Modelle λ_i – dies können z. B. die vom Bayes-Klassifikator als wahrscheinlich ausgegebenen Weichen sein – wird zunächst, wie in Abschnitt 4.4.2.2 gezeigt, die Produktionswahrscheinlichkeit mit dem Produkt aus der Emissionswahrscheinlichkeit b_i und der Zustandsstartwahrscheinlichkeit π_i berechnet:

$$P(\mathbf{O}|\lambda) = \pi_i b_i(O_1). \quad (4.18)$$

Liegt eine Schätzung für die Fahrzeugposition vor, so sind nahe gelegene Weichen mit einer höheren Zustandsstartwahrscheinlichkeit zu beaufschlagen. Es werden die m Modelle λ_i mit den höchsten Produktionswahrscheinlichkeiten $P(\mathbf{O}|\lambda)$ bestimmt und für die weitere Verarbeitung berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Weiche k ergibt sich analog zu Gl. (4.17).

2. Für die weiteren Zeitpunkte t wird die **Rekursion** aller Modelle $\lambda_1 \dots \lambda_m$ gemäß Gleichung (4.15) bis zum Zeitpunkt T durchlaufen. Gleichzeitig werden alle mit dem Bayes-Klassifikator klassifizierten Weichen als mögliche Kandidaten betrachtet.

3. Bei jedem Zeitpunkt t wird mit der folgenden **Modellauswahl** das Modell mit der geringsten Produktionswahrscheinlichkeit

$$P(\mathbf{O}|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_t(i)$$

terminiert und durch den besten Kandidaten aller klassifizierten Weichen, welcher für den Zeitpunkt t nicht Bestandteil eines der verfolgten Modelle sein darf, ersetzt. Als Zustandsstartwahrscheinlichkeit kann die Wahrscheinlichkeit $P(k|s)$, die der Bayes-Klassifikator ausgibt, verwendet werden.

Durch den im Schritt der Modellauswahl zwingenden Austausch von Modellen mit gleichzeitiger erneuter Initialisierung kann wirksam vermieden werden, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit klassifizierte Weichen bei der Ortung möglicherweise unberücksichtigt bleiben, weil sie nicht dem Zustand in einem der verfolgten Modelle entsprechen. Auch ggf. vorhandene Fehler in der gespeicherten Topologie können somit abgemildert werden, wenn bei jedem Schritt neue Modelle initialisiert werden.

4.4.3 Berechnung einer apriori-Wahrscheinlichkeit

Bei der Verwendung von HMMs zur Klassifikation kommt dem apriori-Wissen über die Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen eine herausragende Rolle zu. Dieses Vorwissen dient z. B. bei der Spracherkennung dazu, unsinnige Kombinationen von Wörtern und Satzteilen auszuschließen. Auf die Weichenerkennung übertragen bedeutet die zum einem die in Abschnitt 4.1.1.2 beschriebene Eigenschaft der Netztopologie auszunutzen, dass nur eine eingeschränkte Anzahl von möglichen Fahrwegen im Netz existiert. Aufgrund der Markov-Eigenschaft erhält man damit aus dem zuletzt klassifizierten Ereignis Vorwissen über das nächste zu erwartende Ereignis. Hiermit lässt sich der Suchraum des Klassifikator bereits effektiv einschränken.

Berücksichtigung der Weichenposition Damit bei der Ortung die Weichenposition zur Verbesserung der Klassifikation herangezogen werden kann, muss die Position einer Weiche im Netz und die Entfernung zu den jeweils nächsten Weichen bekannt und in der Streckendatenbank (siehe Abschnitt 4.2.2) gespeichert sein. Damit existiert eine Vorabinformation, an welcher Stelle bzw. nach welcher Entfernung die nächstfolgende Weiche zu erwarten ist. Unter der Annahme einer korrekten Karte kann die detektierte

Position dieser Weiche als gaußverteilt mit der Sollposition als Mittelwert und der Messunsicherheit der Wegmessung als Standardabweichung angenommen werden.

Initialisierung des Modells Zur Initialisierung der Positionsmessung und damit der zugrundeliegenden Modelle können z. B. Positionsdaten eines GNSS-Sensors benutzt werden. Es wird dann nur nach Weichen in der näheren Umgebung gesucht. Dies hat bei der Weichenerkennung die Einschränkung des Suchraums zur Folge und ist eine wichtige Methode zur Beschleunigung der Berechnung und Verbesserung der Klassifikation, was in Abschnitt 3.4.10 anhand von Messdaten dargelegt wurde. Stehen keine Positionsmessungen zur Verfügung, so kann bei der Eisenbahn auch anhand von Fahrplandaten eine Position zumindest grob geschätzt werden.

Unterscheidung mehrerer Fahrwege Bei der Eisenbahn gibt es für jeden Zug einen Fahrplan. Für den Bereich von Bahnhöfen mit mehreren Fahrmöglichkeiten existiert zudem eine Bahnhofsfahrordnung, die festlegt, welcher Zug wann welches Gleis benutzen soll. Dieses Vorwissen kann ebenfalls in die Klassifikation einfließen, da es stets wahrscheinlicher ist, dass ein Zug den vorgegebenen Fahrweg benutzt, als einen anderen, nicht im voraus geplanten.

Klassifikation ohne Referenzdaten Auch bei der Klassifikation von Bauteilen ohne weitere Referenzdaten lässt sich Vorwissen einbringen. So ist es z. B. wahrscheinlich, dass nach einer anliegenden Weichenzunge ein Herzstück folgt, da bei einer Weiche diese Bauteile in Kombination auftreten. Für die Kombination aus abliegender Weichenzunge und Radlenker gilt dies sinngemäß. Dieses von genauen Referenzdaten einer Strecke unabhängige Vorwissen kann die Klassifikation ebenfalls verbessern.

Ein entscheidender Systemvorteil bei der Eisenbahn ist die Existenz eines Fahrplans, von dem z. B. im Personenverkehr im normalen Betrieb nur in geringen Grenzen abgewichen werden soll. Damit stehen zuverlässige apriori-Daten zur Verfügung, welche die Ortung wesentlich vereinfachen können. Allerdings ist darauf zu achten, dass ein Ortungssystem gerade im Fall von Störungen sicher und zuverlässig arbeiten muss. Daher sind unbedingt auch mögliche größere Abweichungen vom geplanten Betrieb zu berücksichtigen. Für diese Fälle ist dann eine verfügbare Ortungssensorik unerlässlich, welche auch ohne apriori-Daten funktioniert. Dies wird für die Weichenerkennung im folgenden Abschnitt gezeigt.

4.4.4 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden einige erste Ergebnisse der modellbasierten Klassifikation mit einem HMM dargestellt. Zur Vereinfachung wurde auf die Berechnung einer apriori-Wahrscheinlichkeit gemäß Abschnitt 4.4.3 verzichtet. Dies soll zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Zum Testen der Verfahren wurden fünf Messfahrten ab Bad Herrenalb unter jeweils gleichen Bedingungen aufgenommen. Aus einer dieser Messfahrten wurden die Weichen-Referenzmuster extrahiert. Drei andere Messfahrten wurden zur Berechnung der Emissionswahrscheinlichkeiten $b_{jk} = P(O_t = o_k | E_t = j)$ bei bekannter Weiche k verwendet. Anhand der in Tab. 4.3 dargestellten ersten Beobachtung des Bayes-Klassifikators bei der fünften Messfahrt werden die wahrscheinlichsten Weichen als mögliche Modelle λ_i initialisiert.

Tabelle 4.3: Erste Beobachtung (Weiche 1090303).

k	$P(k \mathbf{s})$
1090303	69,74 %
1031303	5,92 %
1080102	5,79 %
1050103	4,57 %
...	...
0-Weiche	6,48 %

Nach der ersten Beobachtung ergeben sich bei der Annahme einer gleichverteilten Zustandsstartwahrscheinlichkeit die in Tab. 4.4 zusammengefassten Produktionswahrscheinlichkeiten. Da in der ersten Beobachtung zunächst zehn Weichen klassifiziert worden sind, wurden alle Modelle mit einer Zustandsstartwahrscheinlichkeit von 10 % initialisiert.

Tabelle 4.4: Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeiten und erstes Klassifikationsergebnis (Weiche 1090303).

k	π_k	b_{jk}	$P(\mathbf{O} \lambda_i)$	P_k
1090303	10,00 %	68,31 %	6,83 %	4,76 %
1031303	10,00 %	40,78 %	4,01 %	0,24 %
1080102	10,00 %	90,73 %	9,01 %	0,53 %
1050103	10,00 %	78,32 %	7,83 %	0,36 %

Hieraus werden gemäß Tab. 4.5 die drei wahrscheinlichsten Zustände als Modelle

initialisiert. Angegeben sind jeweils die laut Streckenkarte folgenden Zustände, welche alle mit einer Übergangswahrscheinlichkeit von $a_{i,j}=1$ folgen.

Tabelle 4.5: Nach dem ersten Klassifikationsergebnis initialisierte Modelle λ_i .

λ_i	$P(\lambda_i)$	E_1	E_2	E_3	...
1	84,25 %	1090303	1090212	1099000	...
2	9,38 %	1080102	1070400	1070303	...
3	6,37 %	1050103	1041200	1040980	...

Nach der nächsten befahrenen Weiche, der zweiten Beobachtung, liefert der Bayes-Klassifikator das in Tab. 4.6 dargestellte Ergebnis.

Tabelle 4.6: Zweite Beobachtung (Weiche 1090212).

k	$P(k s)$
1090212	68,74 %
1031701	6,98 %
1031100	3,20 %
1030702	3,47 %
...	...
0-Weiche	17,61 %

Nach dieser Beobachtung werden wiederum die Produktionswahrscheinlichkeiten berechnet. Neu initialisiert wird die Weiche 1031701 mit ihrer Wahrscheinlichkeit aus Tab. 4.6. Wie in Tab. 4.7 ersichtlich, werden die Produktionswahrscheinlichkeiten wiederum mit der Beobachtungswahrscheinlichkeit gewichtet.

Tabelle 4.7: Berechnung der Produktionswahrscheinlichkeiten und zweites Klassifikationsergebnis (Weiche 1090212).

k	α_1	b_{jk}	$P(\mathbf{O} \lambda_i)$	P_k
1090212	6,83 %	73,87 %	5,04 %	3,46 %
1070400	9,01 %	66,12 %	5,96 %	0,00 %
1041200	7,83 %	67,93 %	5,32 %	0,00 %
1031701	6,98 %	94,39 %	6,59 %	0,46 %

Damit ergeben sich nach der zweiten Beobachtung die in Tab. 4.8 dargestellten verfolgten Modelle.

Tabelle 4.8: Nach dem zweiten Klassifikationsergebnis verfolgte Modelle λ_i .

λ_i	$P(\lambda_i)$	E_1	E_2	E_3	...
1	88,27 %	1090303	1090212	1099000	...
2	11,73 %	–	1031701	1031303	...
3	0,00 %	1080102	1070400	1070303	...

Bereits aus diesen recht rudimentären Messergebnissen wird die grundsätzliche Eignung von HMMs zur modellgestützten Klassifikation von Eisenbahnweichen deutlich. Da die Ergebnisse der Klassifikation über mehrere Zeitschritte hinweg berücksichtigt werden, können sich einzelne schlechte Klassifikationsergebnisse nicht mehr so stark auf das Gesamtergebnis auswirken. Sofern die Topologie des befahrenen Netzes bekannt ist, lassen sich auch die Übergangswahrscheinlichkeiten a_{ij} sehr einfach angeben. Die Emissionswahrscheinlichkeiten b_{jk} können aus Referenzmessungen gewonnen werden.

Insbesondere bei großen Datenbanken mit einer großen Anzahl an Weichenreferenzen sind noch deutlichere Verbesserungen gegenüber dem einfachen Bayes-Klassifikator zu erwarten, da in diesem Fall mehr gleichartige Weichen, welche sich nicht immer eindeutig voneinander unterscheiden lassen, vorhanden sein werden.

Nachdem in diesem und den beiden vorangegangenen Kapiteln verschiedene Verfahren vorgestellt wurden, welche zur Ortung eines Schienenfahrzeugs mit Wirbelstrom-Sensoren dienen, wird im abschließenden Kapitel auf die aus diesen Verfahren resultierenden Auswirkungen auf die Sicherheit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems zur Ortung eingegangen.

5 Betrachtungen zu Sicherheit und Verfügbarkeit

In diesem Kapitel werden Betrachtungen zu Sicherheit und Verfügbarkeit des in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Wirbelstrom-Messsystems dargestellt. Nach einer kurzen Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte zur signaltechnischen Sicherheit liegt der Schwerpunkt dieses Kapitels weniger auf einer umfassenden theoretischen Betrachtung des Messsystems und der Einzelkomponenten, als vielmehr auf den in bestimmten Betriebssituationen aus den praktischen Erfahrungen an der Strecke gewonnenen Erkenntnissen über das Verhalten des Sensorsystems. Hieraus werden ansatzweise einige Aspekte erörtert, die für die sichere Ortung mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Wirbelstrom-Sensorsystem relevant sind.

5.1 Signaltechnische Sicherheit

Für die Anwendung von Messsystemen zur sicherheitsrelevanten Ortung muss deren signaltechnische Sicherheit nachgewiesen werden. Hierzu existieren verschiedene Normen (CENELEC EN 50129 [9], Mü8004 [45]), in denen Anforderungsklassen und Regeln zum Sicherheitsnachweis definiert sind. In [38] wird auf die Bestimmung signaltechnisch sicherer Fehlergrenzen für die Erfassung der Bewegungszustände von Bahnen auf Grundlage dieser Normen eingegangen.

5.1.1 Vertrauensintervall

In Kapitel 2 wurde bereits auf die Messunsicherheit der Geschwindigkeits- und Wegmessung mit dem Wirbelstrom-Sensor eingegangen. Dabei wurde stets angenommen, dass die unsicherheitsbehafteten Messwerte normalverteilt um den wahren Wert streuen. Zu jedem Messwert wird eine Standardabweichung als Messgüte angegeben.

Bei sicherheitsrelevanten Anwendungen wird hingegen zu jeder Messung ein sogenanntes Vertrauensintervall gefordert, in dem sich bei einem Messwert m_i der

wahre Wert w_i mit Signifikanzniveau befindet. Für diskrete Messgrößen – im Falle der Wegmessung z. B. bei der Verwendung von Balisen, Achszählern oder auch detektierten Weichen – lässt sich ein solches Intervall vergleichsweise einfach deterministisch bestimmen. Bei kontinuierlichen Informationsquellen spielen die stochastischen Eigenschaften eine wesentlich Rolle, die wahren Werte w_i müssen sich dann innerhalb eines Intervalls

$$m_i - g_{i,o} \leq w_i \leq m_i + g_{i,u} . \quad (5.1)$$

befinden. Hierbei ist $g_{i,o}$ die obere, $g_{i,u}$ die untere Grenze der möglichen Messabweichung von m_i vom wahren Wert w_i .

Die einfachste Möglichkeit, ein Vertrauensintervall zu bestimmen, ist mithilfe der Varianz σ_g der Messungen (Wiederholgenauigkeit); ein gängiger Wert ist die Angabe einer $7,6\text{-}\sigma_g$ -Umgebung um den Mittelwert [38], was als Extrapolation zu verstehen ist. In [38] wird außerdem ein wesentlich eleganterer Weg der Berechnung von Vertrauensintervallen mittels der Bestimmung von Fehlergrenzen aufgezeigt.

5.1.2 Ausfalldetektion

Liegen die Messwerte außerhalb des Vertrauensintervalls und wird dies nicht erkannt, so liegt ein gefährlicher Zustand vor. Daher ist es sicherheitstechnisch relevant, einen Ausfall zu detektieren, um einen gefährlichen Zustand vermeiden zu können. Der Ausfall kann dann als Störung signalisiert werden und ggf. einen Alarm auslösen.

Ein Ausfall eines Sensors bedeutet, dass dieser einen Messwert mit einer unzulässig hohen Abweichung liefert. Die einfachste Möglichkeit, dies zu erkennen, wäre der Vergleich mit dem wahren Wert, was allerdings im Betrieb nicht möglich ist. Somit beschränkt sich die Ausfalldetektion auf eine Konsistenzprüfung der Messwerte verschiedener Sensoren [38]. Eine sinnvoll gesetzte Detektionsschwelle, welche eine Informationsquelle, d. h. einen Sensor, gegenüber den anderen Informationsquellen als inkonsistent kennzeichnet, erlaubt die Ausfalldetektion.

An dieser Stelle wird deutlich, dass ein Kalman-Filter (siehe Abschnitt A.3.3) nicht signaltechnisch sicher ist, da aus allen Informationsquellen lediglich ein gewichteter Mittelwert berechnet wird. Ein Sensorausfall wird nicht erkannt und damit auch nicht ausgegeben, sofern nicht z. B. in jedem Iterationsschritt die Residuen des Kalman-Filters analysiert werden. Im folgenden wird auf zwei mögliche Ausfallszenarien eingegangen.

5.1.2.1 Sprunghafte Änderung von Messwerten (Sprungausfall)

Der für die Ausfalldetektion günstige Fall ist eine sprunghafte Änderung eines Messwertes. In diesem Fall ist die Konsistenzprüfung theoretisch sogar mit nur einem Sensor möglich, da ein Sprung als solcher im Sensorsignal erkannt werden kann. Werden z. B. die aufgrund der Fahrzeugdynamik erlaubten Wertebereiche der Beschleunigung verletzt, so ist der Sensorausfall detektierbar.

5.1.2.2 Langsame Änderung von Messwerten (Driftausfall)

Wesentlich schwieriger zu detektieren als der Sprungausfall ist ein langsames Verlassen des erlaubten Wertebereichs, der Driftausfall. Hier ist auf jeden Fall ein Vergleichssensor erforderlich, da ein Driftausfall mit einer geringen Steigung nicht als Ereignis erkannt werden kann. Allein anhand der Messwerte kann bei nur zwei Sensoren nicht bestimmt werden, welcher Sensor ausgefallen ist. In diesem Fall wäre das Gesamtsystem als ausgefallen zu betrachten.

In allen Fällen eines Ausfalls ist das Ziel, einen gefährlichen Zustand zu vermeiden bzw. in kürzester Zeit wieder einen sicheren Zustand herzustellen. Falls das Sensorsystem nicht mehr in einen sicheren Zustand gebracht werden kann, so muss der Betrieb umgehend angehalten werden.

5.1.3 Sicherer und gefährlicher Zustand

Das Ziel beim Betrieb sicherheitskritischer Prozesse, zu denen auch der Eisenbahnbetrieb gehört, ist es, stets einen sicheren Betriebszustand zu erreichen. Ein gefährlicher Zustand G wird z. B. dann erreicht, wenn der wahre Wert außerhalb des Vertrauensintervalls liegt. Wird allerdings der gefährliche Zustand bei einer Konsistenzprüfung der Messwerte erkannt (Alarm A), kann durch bestimmte Maßnahmen, z. B. der Abschaltung des Messsystems, wieder ein sicherer Zustand erreicht werden. Die Wahrscheinlichkeit

$$P(G \cap \bar{A}) = P(G) \cdot P(\bar{A}|G), \quad (5.2)$$

dass ein gefährlicher Zustand G eintritt, ohne einen Alarm A auszulösen, sollte minimal klein sein. Sobald ein Alarm ausgelöst wurde, kann das Gesamtsystem mit geeigneten Maßnahmen dann wieder in einen sicheren Zustand gebracht werden. Bei der Eisenbahn wird man im Zweifelsfall alle Züge umgehend anhalten, die gefährdet werden oder selbst eine Gefahr darstellen können.

Hinsichtlich der Konsistenzprüfung der Messwerte zeigt sich, dass mit einem einzigen Messsystem als Informationsquelle keine signaltechnische Sicherheit realisiert werden kann, da z. B. ein langsames Wegdriften der Messwerte nicht erkannt wird. Abhilfe kann hier ein redundanter Aufbau des Messsystems schaffen.

5.1.4 Prinzip der Redundanz

Redundante Messung bedeutet die mehrfache unabhängige Messung der gleichen Messgröße. Beim Prinzip der Redundanz unterscheidet man zwischen der homogenen Redundanz und der diversitären Redundanz, je nachdem ob gleichartige oder voneinander unabhängige Messverfahren verwendet werden.

5.1.4.1 Homogene Redundanz

Beim Konzept der homogenen Redundanz wird eine Messgröße mittels mindestens zweier unabhängiger Messaufnehmer gemessen, wobei jeweils das gleiche Messprinzip zugrundeliegt. Der zufällige Ausfall eines Messaufnehmers kann durch die übrigen kompensiert werden. Ein Versagen z. B. des physikalischen Messprinzips oder der Messauswertung bleibt allerdings möglicherweise unerkannt. Beispielsweise würden mehrere optische Sensoren, welche gleichsam empfindlich gegenüber Verschmutzung sind, auch ggf. zur gleichen Zeit ausfallen, ohne das dies als Ausfall erkannt werden kann. Insbesondere wenn Ausfälle nicht sicher ausgeschlossen werden können, ist daher das nachfolgend beschriebene Prinzip der diversitären Redundanz zu bevorzugen.

5.1.4.2 Diversitäre Redundanz

Das Konzept der diversitären Redundanz beruht auf der Anwendung ungleichartiger Mittel, z. B. unterschiedlicher physikalischer Prinzipien oder unterschiedlicher Arten der Signalverarbeitung, zur Lösung der gleichen Messaufgabe. Ein bedeutender Vorteil ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines sicherheitsrelevanten, d. h. nicht als solchen erkannten Ausfalls aller Komponenten wesentlich geringer ist, als bei der Anwendung gleichartiger Messprinzipien.

Das Prinzip der Redundanz ist die technisch bedeutendste Sicherungsmaßnahme, vor allem bei komplexen Hard- und Softwaresystemen [38], da bei solchen Systemen nicht mehr alle möglichen Fehlerursachen analytisch erfasst werden können. Bei der redundanten Auslegung wird man daher stets eine größtmögliche Diversität anstreben.

5.2 Signaltechnische Sicherheit beim Wirbelstrom-Sensorsystem

Da noch keine ausreichenden Daten aus Feldversuchen mit der Wirbelstrom-Sensorik vorliegen, sind keine quantitativen Angaben, z. B. zu Vertrauensintervall oder Ausfallrate, möglich. Im folgenden werden daher qualitative Aspekte, welche aus dem prinzipiellen Aufbau des Systems herrühren, näher ausgeführt.

5.2.1 Gültigkeitsbereich

Die Wirbelstrom-Sensorik besitzt, wie in Abschnitt 2.2.2 dargelegt, prinzipbedingt einen eingeschränkten Messbereich und erlaubt nur die Messung von Geschwindigkeiten $v \geq 1,2$ m/s (siehe Abschnitt A.2.1). Diese Geschwindigkeiten sind direkt mit dem Korrelator oder per Frequenzanalyse messbar. Eine Stillstandserkennung, also die Messung von $v = 0$, ist nur indirekt über eine Leistungsmessung im Sensorsignal realisierbar.

5.2.2 Redundanzen beim Wirbelstrom-Sensorsystem

Die Wirbelstrom-Sensorik ist teilweise redundant aufgebaut. Zum einen stehen zwei auf unterschiedlichen Erregerfrequenzen arbeitende Sensorkanäle zur Verfügung, zum anderen erfolgt die Geschwindigkeits- und Wegmessung mit z. T. diversitären Messprinzipien.

5.2.2.1 Redundanz durch zweikanalige Ausführung

Das Wirbelstrom-Sensorsystem besitzt, wie in Abb. 5.1 skizziert, zwei voneinander prinzipiell unabhängige Kanäle¹, welche auf unterschiedlichen Frequenzen arbeiten. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Störsignale in gleicher Weise auf beide Kanäle auswirken, wesentlich geringer als bei der Verwendung gleicher Erregerfrequenzen. Diese Eigenschaft wurde bereits in Abb. 2.8 deutlich.

Hieraus ergibt sich eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass in beiden Kanälen auftretende Störsignale korreliert sind. Fällt ein Sensorkanal sprunghaft aus, so kann dies mit dem anderen Kanal erkannt und ggf. kompensiert werden.

¹Das Wirbelstrom-Prüfgerät der Firma Förster ist komplett zweikanalig redundant aufgebaut, es existiert lediglich eine gemeinsame Stromversorgung. Der von BT RCS realisierte Industrieprototyp hat für beide Kanäle ein gemeinsames Erregermodul, die Messsignalaufbereitung erfolgt wiederum für jeden Kanal redundant in einem eigenen Modul.

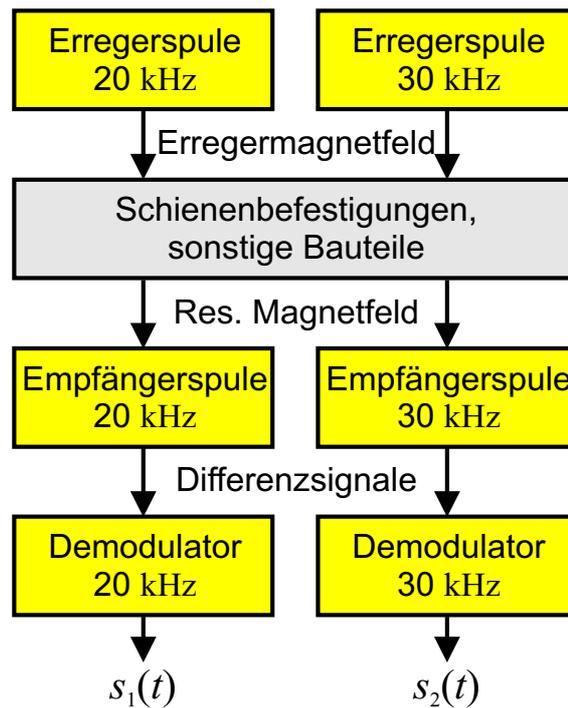


Abbildung 5.1: Redundanter Aufbau des Wirbelstrom-Sensorsystems.

5.2.2.2 Diversitäre Messprinzipien zur Geschwindigkeitsmessung

Das Wirbelstrom-Sensorsystem erlaubt die Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit mit zwei unterschiedlichen Verfahren, der Laufzeit-Korrelation (siehe Abschnitt 2.3) und der Frequenzanalyse (siehe Abschnitt 2.4). Zwar basieren beide Verfahren auf denselben Sensorsignalen, jedoch unterscheiden sich die Auswerteprinzipien derart, dass von diversitären Messprinzipien gesprochen werden kann. Abbildung 5.2 zeigt den Signalverlauf der Geschwindigkeitsmessung.

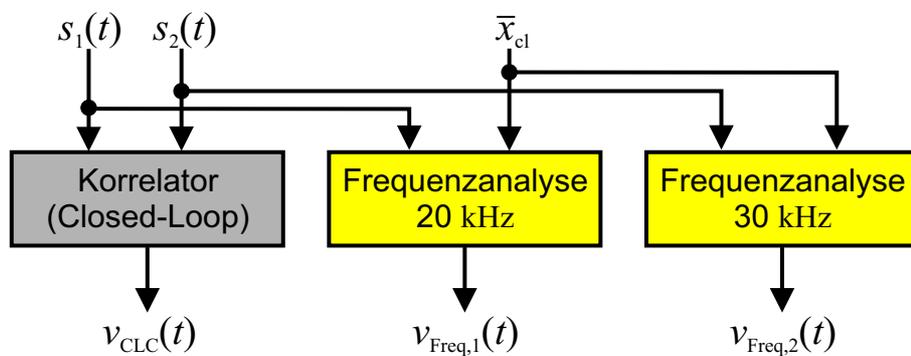


Abbildung 5.2: Diversitäre Messprinzipien zur Geschwindigkeitsmessung mit dem Wirbelstrom-Sensorsystem.

Die Laufzeit-Korrelation arbeitet weitgehend unabhängig von der Art der Sensorsignale und damit von der Art der Infrastruktur. Die Analyse der Schwellenfrequenz setzt im Gegensatz dazu die Sensorsignale in einen Bezug zu Vorwissen über die Charakteristik der Sensorsignale und damit über die Infrastruktur – hier über den mittleren Schwellenabstand \bar{x}_{cl} . Damit können beide Verfahren sich gegenseitig in ihrer Konsistenz überprüfen.

5.2.2.3 Diversitäre Messprinzipien zur Positions- und Wegmessung

Die Positionsmessung mit dem Wirbelstrom-Sensorsystem erfolgt zum einen relativ mit der Odometrie. Da der zurückgelegte Weg über eine Integration der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt wird, sind die Messwerte prinzipbedingt stets mit einer Drift behaftet. Dies muss, wie auch beim klassischen Radumdrehungszähler, bei der Angabe eines Vertrauensintervalls berücksichtigt werden.

Zum anderen erlaubt die Weichenerkennung eine von der Odometrie vollkommen unabhängige und außerdem absolute Positionsmessung. Zwar werden wie auch bei der Geschwindigkeitsmessung dieselben Sensorsignale zur Messung verwendet, jedoch unterscheiden sich die Messprinzipien wiederum so grundlegend voneinander, dass sie als diversitär zu betrachten sind. Zusätzlich ist die Weichenerkennung zweikanalig redundant aufgebaut.

Für die Angabe eines Vertrauensintervalls der Wegmessung sind diese diversitären Auswerteprinzipien der Wirbelstrom-Sensorik vorteilhaft. Da die Odometrie stets driftbehaftet ist, vergrößert sich das Vertrauensintervall mit der Zeit, da die mögliche Abweichung ansteigt. Wird die Wegmessung an Ortsmarkierungen wieder synchronisiert, so verkleinert sich auch das Vertrauensintervall [38]. Mit dem Wirbelstrom-Sensorsystem erfolgt dies an jeder klassifizierten Weiche, sofern diese eindeutig erkannt wurde. Damit ist es möglich, ohne den Einbau zusätzlicher Ortsmarkierungen, die maximale Größe des Vertrauensintervalls zu begrenzen.

5.2.2.4 Ausfalldetektion

Ein Sprungausfall der Geschwindigkeitsmessung kann bei von außen aufgeprägten Störsignalen auftreten. Im Falle eines schmalbandigen Störsignals kann die Frequenzanalyse beeinträchtigt werden; sofern das Störsignal in beiden Sensorkanälen korreliert ist, wird die Laufzeit-Korrelation falsche Werte liefern. Da ein Schienenfahrzeug jedoch eine vergleichsweise träge Fahrzeugdynamik besitzt, kann der erlaubte Bereich bei der Geschwindigkeitsänderung entsprechend eng begrenzt werden, so dass derartige Ausfälle sicher erkannt werden können.

Außerdem treten solche von außen aufgeprägten Störsignale nur örtlich begrenzt auf und sind damit in der Regel von kurzer Dauer; zudem wirken sie sich wegen der unterschiedlichen Erregerfrequenzen des Wirbelstrom-Sensors nur bei sehr breitbandigen Signalen auf beide Kanäle aus.

Bei der Verwendung eines CLC besteht die Gefahr, dass der Korrelator anstelle des Hauptmaximums ein Nebenmaximum findet und dieses verfolgt. Dies kann z. B. nach einer kurzzeitigen Störung des Sensorsignals auftreten oder wenn dem Korrelator ein falscher Geschwindigkeitswert zur Schätzung der Signallaufzeit vorgegeben wird. Da der CLC das gefundene Maximum verfolgt, wird über eine längere Zeit ein falscher Geschwindigkeitswert ausgegeben. Dies kann allerdings mittels einer Plausibilitätsprüfung – hierfür eignen sich sowohl der OLC als auch die Frequenzanalyse – detektiert werden.

Ein Driftausfall der Geschwindigkeitsmessung ist als sehr unwahrscheinlich anzusehen. Bei der Laufzeit-Korrelation müsste sich der wirksame Sensorabstand l entsprechend langsam verändern, was als ausgeschlossen gelten kann. Bei der Frequenzanalyse kann sich zwar der Abstand \bar{x}_{cl} der Schienenbefestigungen langsam ändern, wie dies in Abschnitt 2.4.2 erläutert wurde. Jedoch existieren vergleichsweise enge Grenzen, in denen sich der Schwellenabstand überhaupt bewegen kann. Ein Driftausfall der von der Geschwindigkeitsmessung abhängigen Wegmessung ist ebenso wenig wahrscheinlich.

Da für die Weichenerkennung bereits ein Sensorkanal genügt, lässt sich dieses Teilsystem redundant realisieren. Aufgrund der Tatsache dass die Kanäle auf unterschiedlichen Frequenzen arbeiten, treten auch bei der Weichenerkennung Störungen zumeist nur in einem Sensorkanal auf. Dies ermöglicht wiederum in aller Regel eine sichere Ausfalldetektion.

5.3 Signaltechnische Sicherheit im Kontext eines Ortungssystems

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, besitzt das hier vorgestellte Wirbelstrom-Sensorsystem bereits gewisse Redundanzen, die sich positiv auf die Sicherheit der mit diesem Sensor realisierten Ortung auswirken. Im folgenden wird nun der Wirbelstrom-Sensor als Teil eines Ortungssystems betrachtet.

In zurzeit erhältlichen handelsüblichen Fahrzeugausrüstungen für ETCS, wie z. B. dem System TRAINGUARD [11] der Firma Siemens, werden als Ortungssensoren neben dem Radumdrehungszähler als Wegimpulsgeber ein Radarsensor zur Geschwindigkeitsmessung und eine ETCS-Fahrzeugantenne zum Auslesen

der Eurobalisen eingesetzt. Abbildung 5.3 zeigt die ETCS-Komponenten, welche im Fahrzeug und an der Strecke verbaut sind, in einer Übersicht.

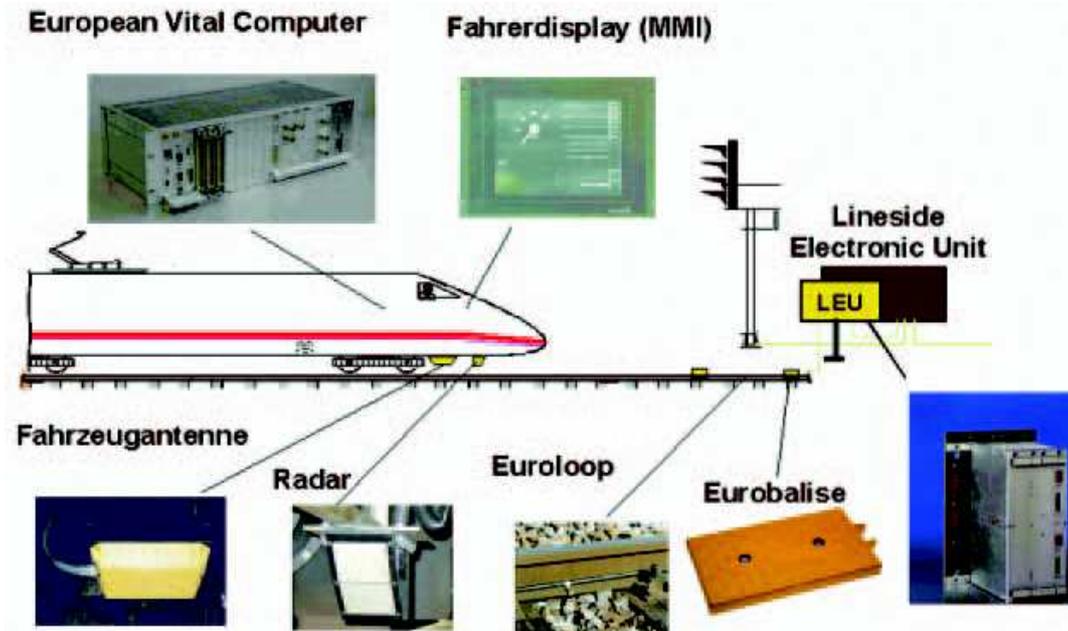


Abbildung 5.3: Beispiel für derzeit gängige ETCS-Komponenten; Quelle: [11].

Die hier verwendeten fahrzeugseitigen Sensoren besitzen für die einzelnen Messgrößen eine diversitäre Redundanz. Die Geschwindigkeitsmessung des Radarsensors kann mit dem Wegimpulsgeber gestützt werden, da beide mit gänzlich unterschiedlichen Verfahren arbeiten. Die Entfernungsmessung des Wegimpulsgebers wird mithilfe der Eurobalisen überwacht und ggf. synchronisiert. Hierzu enthält jede Balise eine Information über die Entfernung zu den benachbarten Balisen. Dieser Wert dient zur Überwachung des Wegimpulsgebers.

Würde man den Radarsensor durch ein Wirbelstrom-Sensorsystem ersetzen, bestünden zusätzliche Möglichkeiten zur Selbstüberwachung des Ortungssystems, da der Wirbelstrom-Sensor neben der Geschwindigkeit auch Positionen messen kann. Damit wären dann, wie in Tab. 5.1 zusammengefasst, alle Größen diversitär redundant messbar.

Tabelle 5.1: Diversitäre Messprinzipien in einem möglichen Ortungssystem.

Messgröße	Sensor 1	Sensor 2	Überwachung
Geschw.	Wegimpulsgeber	Wirbelstrom-Sensor	–
Weg	Wegimpulsgeber	Wirbelstrom-Sensor	Eurobalise
Position	Eurobalise	Wirbelstrom-Sensor	Wegimpulsgeber

Zusätzlich ist die Überwachung der Wegmessung mithilfe der Eurobalise, die der Positionsmessung mit dem Wegimpulsgeber möglich. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit eines nicht detektierten Ausfalls noch weiter.

Bei der Einbindung in ein System zur gleisselektiven Ortung bietet neben der Eurobalise bei rein bordautonomen Systemen nur der Wirbelstrom-Sensor eine sichere Zuordnung zwischen Positionsmessung und befahrenem Gleisabschnitt. Sofern die GNSS-basierte Positionsmessung eine eindeutige Gleiszuordnung liefert, kann sogar auf die kostenintensive Installation zusätzlicher Balisen verzichtet werden.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges System zur bordautonomen Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren vorgestellt, welches die Anforderungen an eine sicherheitsrelevante Ortung erfüllt. Hierzu bietet die Wirbelstrom-Sensorik zwei unterschiedliche Messkonzepte, die berührungslose Geschwindigkeitsmessung und die Erkennung von Eisenbahnweichen als Positionsmarken.

Zunächst wurde das Prinzip der Wirbelstrom-Sensorik zur Geschwindigkeitsmessung erläutert. Kern des Messkonzepts ist die Verwendung zweier diversitärer Verfahren, zum einen das der Laufzeit-Korrelation und zum anderen das der Frequenzanalyse. Die einzelnen Messwerte werden mittels eines Kalman-Filters so fusioniert, dass die Geschwindigkeitsmessung zuverlässig und präzise möglich ist. So können z. B. Ausfälle eines Sensorkanals zumindest teilweise über einen nicht zu langen Zeitraum kompensiert werden. Hierzu wurden Einflüsse der Signale auf die Messgüte untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde des weiteren ein Konzept entworfen, Sensorsignale aufgrund ihrer Charakteristik bestimmten Bauteilen des Gleises zuzuordnen, um den Fahrweg über Eisenbahnweichen hinweg anhand ihrer jeweiligen Stellung nachzuvollziehen. Mit Wirbelstrom-Sensoren lassen sich Weichen und Weichenbauteile detektieren und klassifizieren. Die Klassifikation basiert auf einer probabilistischen Modellierung. Anhand von realen Messdaten wurde gezeigt, dass mit einem Bayes-Klassifikator eine robuste Klassifikation von Weichen möglich ist. Darüber hinaus liefert der Bayes-Klassifikator ein Gütemaß in Form einer Wahrscheinlichkeit, welche Weiche in welcher Stellung befahren wurde. Dies ermöglicht ohne weitere Einbauten am Gleis eine gleisselektive Ortung des Schienenfahrzeugs. Anhand von Messergebnissen wurde die hervorragende Eignung der Wirbelstrom-Sensorik zur Klassifikation von Weichen und Weichenbauteilen belegt. Dabei wurden stets reale Sensordaten, welche auf einer Eisenbahnstrecke aufgezeichnet wurden, zur Untersuchung der vorgestellten Verfahren verwendet.

Zur Bewertung der Klassifikationsergebnisse wurde außerdem auf die statistischen Eigenschaften und die Modellierung der Streckeninfrastruktur mit einer digitalen Streckenkarte näher eingegangen. Mithilfe einer solchen Karte kann eine Positionsinformation im Rahmen eines Ortungskonzepts weiterverarbeitet werden. Zur Erstellung eines Modells der Strecke eignen sich Hidden-Markov-

Modelle, welche einerseits die Strecken-Infrastruktur repräsentieren, andererseits einen Zusammenhang zwischen erwarteten Werten und realen Messungen herstellen. Messergebnisse von Messfahrten auf der *Albtalbahn* zeigen die Möglichkeit des Einsatzes zur gleisselektiven Ortung im Eisenbahnbereich. Eine Erweiterung des Modells um zusätzliche Eigenschaften ist vorgesehen, um einerseits auf mögliche Fehler in der Streckenkarte reagieren und andererseits auch unbekannte Strecken erfassen zu können.

Da das vorgeschlagene Ortungssystem auch Sicherheitsverantwortung tragen soll, wurde abschließend auf einige ausgewählte grundlegende Aspekte der Sicherheit und Verfügbarkeit des vorgestellten Sensorsystems eingegangen. An dieser Stelle zeigt sich die herausragende Eigenschaft der speziellen Wirbelstrom-Sensorik, eine Ortung auch bei einem teilweisen Ausfall noch zu ermöglichen. Zusätzlich bietet der Wirbelstrom-Sensor weit über die Geschwindigkeitsmessung hinausgehende Messmöglichkeiten, die eine diversitär redundante Auslegung von sicheren Ortungssystemen erlauben.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 5901: *Breitfußschienen; Maße, statische Werte und Stahlsorten*. Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [2] Bauer, M.: *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Wichmann, 4. Auflage, 1997.
- [3] Berger, C.: *Optische Korrelationssensoren zur Geschwindigkeitsmessung technischer Objekte*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr. 1015, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [4] Böhringer, F.: *Train location based on fusion of satellite and train-borne sensor data*. In: Location Services and Navigation Technologies, Y. Zhao, H. A. Klotz Jr., L. A. Stockum (Hrsg.), Proceedings of SPIE, Vol. 5084, 2003.
- [5] Böhringer, F. & Geistler, A.: *Adaption of the kinematic train model using the Interacting Multiple Model estimator*. In: Computers in Railways IX, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (Hrsg.), S. 487-496, WIT Press, Southampton, 2004.
- [6] Bouillaut, L., Weber, P., Salem, A. B. & Aknin, P.: *Use of Causal Probabilistic Networks for the improvement of the Maintenance of Railway Infrastructure*. In: 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Volume 7, S. 6243-6249, New York, 2004.
- [7] Braun, I., König, S. & Schnieder, E.: *Agentensysteme für die Logistik im Schienenverkehr*. In: at – Automatisierungstechnik 52, Nr. 7, S. 328-334, 2004.
- [8] Czommer, R.: *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C Nr. 535, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München, 2001.
- [9] CENELEC EN 50129: *Railway Applications: Safety Related Electronic Railway Control and Protection Systems*. 1993.

- [10] Däubler, L., Bikker, G. & Schnieder, E.: *SATNAB - Satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment*. Signal+Draht 94, Nr. 6, S. 12-15, 2002.
- [11] Didrich, K. & Fiedler, R.: *Effizientes Testverfahren für ETCS-Komponenten*. In: Signal+Draht 97, Nr. 5, S. 10-14, 2005.
- [12] Engelberg, T.: *Geschwindigkeits- und Wegmessung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren – Meßfahrten März 1998 in München*. Report AV 6/98, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1998.
- [13] Engelberg, T.: *Non-contact Speed and Distance Measurement of Rail Vehicles Using Eddy Current Sensors*. IMEKO-XV World Congress, Osaka, Japan, June 13-18, 1999.
- [14] Engelberg, T.: *Laboratory Test of Electrically Conductive Shields for Eddy Current Sensors*. Report AV 5/99, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [15] Engelberg, T.: *Investigation of Shielded Eddy Current Sensors for Speed Measurement of Rail Vehicles – Field Test in Offenburg on 31st October 1999*. Report AV 6/99, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [16] Engelberg, T.: *Speed measurement of Rail Vehicles Using Shielded Eddy Current Sensors – Field-Test 3/00 in Munich*. Report AV 5/00, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2000.
- [17] Engelberg, T.: *Geschwindigkeitsmessung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr. 896, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [18] Euler, S.: *Grundkurs Spracherkennung*. Vorlesungsskript, FH Gießen-Friedberg, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Datenverarbeitung, 2005.
- [19] Fink, G. A.: *Mustererkennung mit Markov-Modellen*. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2003.
- [20] Föllinger, O.: *Laplace- und Fourier-Transformation*. Hüthig-Verlag, Heidelberg, 6. Auflage, 1993.
- [21] N.N.: *Defectomat ECM 2.841 Software-Version 1.0 – Bedienungsanleitung*. Institut Dr. Förster, Reutlingen, 1995.

- [22] Fritsche, R.: *Vergleich berührungsloser Geschwindigkeitsmessverfahren an selbstbeleuchtetem und inkohärent beleuchtetem Walzgut*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1979.
- [23] Geistler, A. & Engelberg, T.: *Laboratory Tests of Shielded Eddy Current Sensors*. Report AV 1/01, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [24] Geistler, A.: *Untersuchung von Wirbelstrom-Sensoren – Messfahrten 2001 bei der AVG Karlsruhe*. Bericht AV 1/02, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [25] Geistler, A.: *Untersuchung von Wirbelstrom-Sensoren – Messfahrten 2001 bei der SBB Bern*. Bericht AV 2/02, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [26] Geistler, A.: *Train location with eddy current sensors*. In: *Computers in Railways VIII*, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (Hrsg.), S. 1053-1062, WIT Press, Southampton, 2002.
- [27] Geistler, A. & Böhringer, F.: *Detection and classification of turnouts using eddy current sensors*. In: *Computers in Railways IX*, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (Hrsg.), S. 467-476, WIT Press, Southampton, 2004.
- [28] Geistler, A. & Böhringer, F.: *Robust velocity measurement for railway applications by fusing eddy current sensor signals*. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, S. 664-669, Parma, 2004.
- [29] Geistler, A. & Böhringer, F.: *Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen mit Wirbelstrom-Sensoren*. In: *ZEVrail Glasers Annalen* 129, Nr. 3, S. 101-106, 2005.
- [30] Geistler, A.: *Eisenbahnbetriebswissenschaft II – Teil Bordautonome Ortung von Schienenfahrzeugen*. Vorlesungsskript, Bericht AV 3/05, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- [31] Geistler, A. & Böhringer, F.: *Stochastische, rekursive Weichenklassifikation zur gleisselektiven Ortung von Schienenfahrzeugen*. In: *at – Automatisierungstechnik* 54 Nr. 3, S. 113-122, 2006.
- [32] Geistler, A., Böhringer, F. & Horn, J.: *Hochverfügbare, präzise Geschwindigkeits- und Wegmessung von Schienenfahrzeugen durch Kombination diversitärer Sensorprinzipien*. In: *Sensoren und Messsysteme 2006*, Vorträge

- der 13. ITG/GMA-Fachtagung in Freiburg/Breisgau, S. 659-662, vom 13. bis 14. März 2006.
- [33] Gielsdorf, F.: *Datenmodellierung für Gleisnetze und Schaffung eines einheitlichen Raumbezugssystems*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1998.
- [34] Holzmann, G., Marks-Fährmann, U., Restetzki, K. & Sudwischer, K.-H.: *Grundwissen Bahn*. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., Haan-Gruiten, 2. Auflage, 2004.
- [35] Hofmann-Wellenhof, B., Kienast, G. & Lichtenegger, H.: *GPS in der Praxis*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1994.
- [36] Horn, J.: *Bildbasierte vektorielle Geschwindigkeitsmessung texturierter Oberflächen*. In: tm – Technisches Messen 72 Nr. 10, S. 556-565, 2005.
- [37] Hummel, B., Tischler, K.: *Robust, GPS-only Map Matching: Exploiting Vehicle Position History, Driving Restriction Information and Road Network Topology in a Statistical Framework*. In: Proc. GIS Research UK (GISRUK), S. 68-77, 2005.
- [38] Kiriczi, S. B.: *Signaltechnisch sichere Fehlergrenzen für die Erfassung der Bewegungszustände von Bahnen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr. 583, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [39] Kuhn, M. H. & Tomaschewski, H. H.: *Improvements in Isolated Word Recognition*. In: IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing ASSP-31 (1983), S. 157-167.
- [40] Laqua, H.: *Berührungslose Geschwindigkeitsmessung von Straßen- und Schienenfahrzeugen mit Mikrowellensensoren*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr. 543, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [41] Leinhos, D.: *Analyse und Entwurf von Ortungssystemen für den Schienenverkehr mit strukturierten Methoden*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 296, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [42] Mansfeld, W.: *Satellitenortung und Navigation*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1998.
- [43] Mesch, F.: *Geschwindigkeits- und Durchflußmessung mit Korrelationsverfahren*. Regelungstechnische Praxis, Heft 3, S. 73-82, 1982.

- [44] Mesch, F., Puente León, F. & Engelberg, T.: *Train-based location by detecting rail switches*. In: Computers in Railways VII, J. Allan, R. J. Hill, C. A. Brebbia, G. Sciutto & S. Sone (Hrsg.), S. 1251-1260, WIT Press, Southampton, 2000.
- [45] Mü8004: *Grundsätze zur technischen Zulassung in der Signal- und Nachrichtentechnik*. Eisenbahn-Bundesamt (Hrsg.), München.
- [46] Myers, C., Rabiner, L. & Rosenberg, A.: *Performance Tradeoffs in Dynamic Time Warping Algorithms for Isolated Word Recognition*. In: IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing 28 (1980), S. 623-635.
- [47] Meyer zu Hörste, M. & Schnieder, E.: *DemoOrt – Ortungsaufgaben mit Sicherheitsverantwortung im Schienengüterverkehr*. In: Innovation für die Schiene, S. 26-28, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2005.
- [48] Oukhellou, L., Aknin, P. & Perrin, J.-P.: *Dedicated sensor and classifier of rail head defects for railway systems*. 8th IFAC Symposium on Transportation Systems, S. 123-126, Chania, 1997.
- [49] Pacht, J.: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1999.
- [50] Polz, J. & Beck, R.: *Automatisches Fahren auf Bahnen nach EBO*. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 49 Nr. 10, S. 680-686, 2000.
- [51] Plan, O.: *GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr*. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Heft 78, Universität der Bundeswehr, München, 2004.
- [52] Praktikum Rechnergestützte Verfahren in der MRT: *Versuch: Digitales Speicheroszilloskop und digitaler Spektrum-Analysator*. Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruhe, 1999.
- [53] Schmidt, M. & Winter, J.: *Anforderungen der GPS-basierten Ortung an den digitalen Streckenatlas*. In: Signal+Draht 92, Nr. 4, S. 12-17, 2000.
- [54] Speck, C.: *Untersuchung von Wirbelstrom-Sensoren zur bordautonomen Erkennung von Eisenbahnweichen*. Diplomarbeit, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [55] Stadlmann, B. & Zwirchmayr, H.: *Einfaches Zugsleitsystem für Regionalstrecken*. In: Signal+Draht 96, Nr. 6, S. 11-16, 2004.

- [56] Stiller, C.: *Vorlesung: Messtechnik II*. Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruhe, 2002.
- [57] N.N.: *Oberbauhandbuch*. ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH, Essen, 2006.
- [58] Titterton, D. H., Weston, J. L.: *Strapdown Inertial Navigation Technology*. Progress in Astronautics and Aeronautics Series, 207, AIAA, 2nd Edition, 2004.
- [59] Vary, P., Heute, U. & Hess, W.: *Digitale Sprachsignalverarbeitung*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1998.
- [60] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) – VDV-Förderkreis (Hrsg.): *Telematik im ÖPNV in Deutschland*. Alba Fachverlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 2001.
- [61] Wendemuth, A.: *Grundlagen der stochastischen Sprachverarbeitung*. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2004.
- [62] Welch, G. & Bishop, G.: *An Introduction to the Kalman Filter*. In: SIGGRAPH 2001, Course 8, University of North Carolina, 2001.
- [63] Wilhelm, A.: *Untersuchung von Strategien zur Erstellung einer digitalen Streckenkarte*. Studienarbeit, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [64] Zeitler, R.: *Digitale Korrelationsmeßsysteme zur eindimensionalen Geschwindigkeitsmessung fester Oberflächen*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8 Nr. 705, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [65] Zomotor, A.: *Ein korrelationsoptisches Verfahren zur direkten Messung von instationären Schwimm- und Schräglaufwinkeln an Kraftfahrzeugen*. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 77, Nr. 7/8, S. 213-218, 1975.

A Anhang

A.1 Notation und Symbole

A.1.1 Operatoren

\exp	Exponentialfunktion
$E\{\cdot\}$	Erwartungswert
$\mathcal{F}\{\cdot\}$	Fourier-Transformation
\otimes	Korrelation
$\ \dots\ $	Euklidischer Abstand (L2-Norm)

A.1.2 Abkürzungen

AKF	<u>A</u> uto- <u>K</u> orrelations <u>f</u> unktion
AVG	<u>A</u> lbtal- <u>V</u> erkehrsgesellschaft mbH, Karlsruhe
BMBF	<u>B</u> undes <u>m</u> inisterium für <u>B</u> ildung und <u>F</u> orschung
BT RCS	<u>B</u> ombardier <u>T</u> ransportation – <u>R</u> ail <u>C</u> ontrol <u>S</u> olutions
CLC	<u>C</u> losed- <u>l</u> oop-Korrelator
DAT	<u>D</u> igital <u>A</u> udio <u>T</u> ape
DB AG	<u>D</u> eutsche <u>B</u> ahn <u>A</u> ktiengesellschaft
DGPS	<u>D</u> ifferential <u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
DTW	Dynamische Zeitverzerrung (engl. <i>dynamic time warping</i>)
EBO	<u>E</u> isenbahnbau- und <u>B</u> etriebs <u>o</u> rdnung
ECM	<u>E</u> ddy <u>C</u> urrent <u>M</u> odule (Wirbelstrom-Modul) (Institut Dr. Förster, Reutlingen)
ECM/LV	<u>L</u> eistung <u>v</u> erstärker für Wirbelstrom-Modul (Institut Dr. Förster, Reutlingen)
ERTMS	<u>E</u> uropean <u>R</u> ail <u>T</u> raffic <u>M</u> anagement <u>S</u> ystem
ETCS	<u>E</u> uropean <u>T</u> rain <u>C</u> ontrol <u>S</u> ystem
EW	<u>E</u> infache <u>W</u> eiche
GMA	<u>G</u> esellschaft für <u>M</u> ess- und <u>A</u> utomatisierungstechnik
GNSS	<u>G</u> lobal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem

HMM	<u>H</u> idden- <u>M</u> arkov- <u>M</u> odell
IBW	<u>I</u> nnenbogenweiche
KKF	<u>K</u> reuz <u>k</u> orrelations <u>f</u> unktion
LZB	<u>L</u> inienz <u>z</u> ugbeeinflussung
MRT	Institut für <u>M</u> ess- und <u>R</u> egelung <u>t</u> echnik, Universität Karlsruhe (TH)
OLC	<u>O</u> pen- <u>l</u> oop-Korrelator
RBL	<u>R</u> echnergestütztes <u>B</u> etriebs <u>l</u> eitsystem
SBB	<u>S</u> chweizer <u>B</u> undes <u>b</u> ahnen
SNR	<u>s</u> ignal-to- <u>n</u> oise <u>r</u> atio (Signal-Rausch-Verhältnis)
SGV	<u>S</u> chienen- <u>G</u> üter <u>v</u> erkehr
SPNV	<u>S</u> chienen- <u>P</u> ersonen- <u>N</u> ah <u>v</u> erkehr

A.1.3 Symbole

A.1.3.1 Allgemein

a	Beschleunigung
\mathbf{a}	Beschleunigungsvektor
i, j, k, m, n	Zählvariablen
$s(t)$	Sensorsignal (zeitabhängig)
$s(x)$	Sensorsignal (ortsabhängig)
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
\mathbf{v}	Geschwindigkeitsvektor
x	Weglänge
\mathbf{x}	Positionsvektor

A.1.3.2 Geschwindigkeits- und Wegmessung

a_k	Beschleunigung im Zustand k
a_q	Querbeschleunigung
d	(Rad-)Durchmesser
ϵ	Messabweichung
f	Frequenz
$i(t)$	(Erreger-)Strom
κ	Krümmung
l	Sensorabstand der Wirbelstrom-Sensoren
\mathbf{P}_k	Kovarianzmatrix

Φ_{12}	Kreuzkorrelationsfunktion (KKF)
Q	Qualitätsfaktor
\mathbf{R}_k	Kovarianz der Messwerte
ϱ_{12}	Kreuzkorrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung
$S(f)$	Spektrum des Signals s
T	(Signal-)Laufzeit
T_M	Messzeit
τ	(Korrelator-)Laufzeit
$u(t)$	(Mess-)Spannung
v_k	Geschwindigkeit im Zustand k
\mathbf{y}_k	Zustandsvektor
x_k	(1D-)Position im Zustand k
\bar{x}_{cl}	Schwellenabstand
\mathbf{z}_k	Messvektor

A.1.3.3 Detektion und Klassifikation von Eisenbahnweichen

α	Ortsverschiebung
c	Irregularität
D_{sr}	normierter Abstand zwischen Signal- und Referenzmuster
k	Weiche bzw. Weichenklasse
\mathbf{K}_k	Kovarianzmatrix
\mathcal{N}	multivariate Gauß-Verteilung
p	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
P	Wahrscheinlichkeit
$P_{s(t)}$	Leistung des Signals $s(t)$
r	Haltefaktor bei der Detektion
\mathbf{r}_i	Referenzsignal der i -ten Weiche (bestehend aus N Samples)
\mathbf{s}	Sensorsignal (bestehend aus N Samples)
$\hat{\sigma}$	empirische Standardabweichung

A.1.3.4 Modellierung der Infrastruktur

a_{ij}	Übergangswahrscheinlichkeit von i nach j
\mathbf{A}	Übergangsmatrix
α_t	Vorwärtsvariable
b_i	Emissionswahrscheinlichkeit
\mathbf{B}	Emissionsmatrix

e	Menge der Zustände
E_k	Ereignis bzw. Zustand
\mathbf{E}	Zustandsfolge
λ_i	Modell bei der Anwendung verschiedener HMMs
m	Modellanzahl
N	Anzahl der Zustände
O_k	Ausgabe (Beobachtung)
\mathbf{O}	Beobachtungsfolge
π_i	Zustandsstartwahrscheinlichkeit
T	Zeitpunkt des Rekursionsabschlusses

A.1.3.5 Betrachtungen zu Sicherheit und Verfügbarkeit

$g_{i,o}$	obere Grenze der möglichen Messabweichung
$g_{i,u}$	untere Grenze der möglichen Messabweichung
m_i	Messwert
P	Wahrscheinlichkeit
w_i	wahrer Wert

A.2 Bestimmung einer optimalen Korrelatormesszeit

Der für den Korrelator-Messbetrieb wichtigste Parameter ist die Korrelatormesszeit T_M , welche auch Mittelungszeit genannt wird. Sie bezeichnet die Zeitspanne, in welcher ein Messwert gewonnen werden kann. Nach Gl. (2.4) ist die Kreuzkorrelationsfunktion für unendlich lange Signale definiert; für endliche Messzeiten T_M ergeben sich mitunter prinzipbedingte Ungenauigkeiten, da die Signale nicht mehr auf ihrer ganzen Länge korreliert sind. Zu lange Mittelungszeiten bewirken hingegen eine Verschlechterung des dynamischen Verhaltens des Korrelators hinsichtlich Geschwindigkeitsänderungen.

A.2.1 Minimale Messzeit aufgrund des Signalspektrums

In bezug auf die Messzeit muss sichergestellt sein, dass mindestens ein Ereignis – hier also eine Schienenbefestigung – in der Messung enthalten ist. Legt man den mittleren Abstand \bar{x}_{cl} zwischen zwei benachbarten Schienenbefestigungen

zugrunde, so ergibt sich für die Messzeit

$$T_M \geq \frac{1}{f_{cl,min}} = \frac{\bar{x}_{cl}}{v_{min}}. \quad (\text{A.1})$$

Die in Abschnitt 2.2.2 erwähnte Hochpassfilterung bedingt bei einer Eckfrequenz von 3,3 Hz eine Minimalfrequenz $f_{cl,min}$ der Sensorsignale von etwa 2 Hz und damit eine Minimalgeschwindigkeit von

$$v_{min} = f_{cl,min} \cdot \bar{x}_{cl} = 2 \text{ Hz} \cdot 0,6 \text{ m} = 1,2 \text{ m/s}, \quad (\text{A.2})$$

bzw. eine Messzeit von

$$T_{M,min} \geq 0,5 \text{ s}. \quad (\text{A.3})$$

Dies gilt sowohl für die Laufzeit-Korrelation als auch für die in Abschnitt 2.4 vorgestellte Frequenzanalyse.

A.2.2 Minimale Messzeit bei Verwendung eines OLC

Die Verwendung eines Open-loop-Korrelators (OLC) bedingt eine zusätzliche Einschränkung der Messzeit T_M , da die Signale beider Sensorkanäle nicht mehr auf ihrer ganzen Länge miteinander korreliert sind, sobald die Signallaufzeit T nicht null ist. Der resultierende Überlappungsbereich $T_M - T$ sollte mindestens so groß wie die Korrelationslänge $\Delta\tau_k$, der Abstand zwischen denen dem Hauptmaximum der KKF nächstgelegenen Minima, sein [64]. Da der Wirbelstrom-Sensor in der verwendeten Konfiguration hauptsächlich die Schienenbefestigungen erfasst, entspricht die Korrelationslänge

$$\Delta\tau_k = \frac{\bar{x}_{cl}}{v} \quad (\text{A.4})$$

dem Kehrwert der Schwellenfrequenz f_{cl} .

Damit erhält man für die Messzeit

$$T_{M,olc} \geq T + \Delta\tau_k = \frac{l + \bar{x}_{cl}}{v_{min}}. \quad (\text{A.5})$$

Mit der geforderten Minimalgeschwindigkeit v_{min} aus Gleichung (A.2) ergibt sich bei einem Sensorabstand l von 0,18 m ein Messzeit von

$$T_{M,olc} \geq \frac{0,18 \text{ m} + 0,6 \text{ m}}{1,2 \text{ m/s}} = 0,65 \text{ s}, \quad (\text{A.6})$$

welche etwas größer ist als die in Abschnitt A.2.1 ermittelte minimal mögliche.

Dieser aus dem endlichen Sensorabstand l herrührende Nachteil der Laufzeit-Korrelation wird bei der Verwendung eines Closed-loop-Korrelators (CLC) vermieden.

A.2.3 Minimale Messzeit bei Verwendung eines CLC

Der CLC verschiebt eines der beiden Signale zunächst um eine Modelllaufzeit T_m , welche der Signallaufzeit T entsprechen sollte. Die resultierende KKF hat ihr Maximum bei der verbleibenden Signallaufzeit T^* , also der Differenz zwischen der Modelllaufzeit T_m und der wirklichen Signallaufzeit T . T^* wird immer wesentlich kleiner sein, als die Signallaufzeit T , welche der OLC bestimmt.

Für $T^*=0$ befindet sich der CLC im Abgleichpunkt und der Überlappungsbereich ist gleich der Messzeit T_M . Die resultierende Laufzeit des CLC ergibt sich damit zu

$$T_{M,clc} \geq \Delta\tau_k = \frac{1}{f_{cl}}. \quad (\text{A.7})$$

Diese Messzeit entspricht damit der minimal möglichen Messzeit T_M .

Zusätzlich hat der CLC die Eigenschaft, das Maximum der KKF zu verfolgen. Damit wird der Suchraum für das Maximum der KKF durch die zwischen zwei Messungen maximal erlaubte Beschleunigung entsprechend begrenzt. Insbesondere bei langen Messzeiten mit vielen Ereignissen ist dies sinnvoll, da sonst mitunter ein falsches absolutes Maximum – im eigentlichen Sinne ein Nebenmaximum – gefunden werden könnte.

A.3 Fusion der Geschwindigkeitswerte mittels eines Kalman-Filters

In den vorangegangenen Abschnitten wurden einige unterschiedliche Messverfahren vorgestellt, mit denen die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs mit Wirbelstrom-Sensoren gemessen werden kann. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sollen gewichtet zu einem Gesamtergebnis kombiniert werden. Des Weiteren ist es sinnvoll, die Kinematik des Fahrzeugs, welches sich in der Regel zwischen den Messungen bewegen wird, zu modellieren, und so z. B. eine Mittelung der Geschwindigkeitsmessung über mehrere Zeitschritte zu ermöglichen.

In diesem Abschnitt wird auf die grundlegenden Ideen und Zusammenhänge einer Fusion auf Datenebene mittels eines Kalman-Filters eingegangen. Aus den Eingangsgrößen, den Messwerten für die Fahrzeuggeschwindigkeit v_{clc} des Closed-loop-Korrelators und $v_{\text{Freq},1}$ bzw. $v_{\text{Freq},2}$ der Frequenzanalyse, werden die Fahrzeuggeschwindigkeit v und der gefahrene Weg x geschätzt.

Neben einer Beschreibung des jeweils zugrundeliegenden System- bzw. Beobachtungsmodells wird das für die Geschwindigkeits- und Wegmessung von Schienenfahrzeugen entwickelte Kalman-Filter beschrieben. In Abschnitt 2.5.2 wurde anhand eines Beispiels die Verbesserung der Messung durch die Datenfusion aufgezeigt.

A.3.1 Systemmodell

Zur Modellierung der Fahrzeugbewegung wird ein kinematisches Modell benötigt, welches das Systemverhalten des Fahrzeugs repräsentiert. Gleichung (A.8) beschreibt das diskrete kinematische Modell in einer allgemeinen Form als Taylor-Reihe

$$x_k = x_{k-1} + \Delta t \cdot v_{k-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot a_{k-1} + \frac{1}{6} \Delta t^3 \cdot r_{k-1} + \dots, \quad (\text{A.8})$$

worin x_k die Position im Zeitpunkt k , x_{k-1} die Position, v_{k-1} die Geschwindigkeit, a_{k-1} die Beschleunigung und r_{k-1} die Beschleunigungsänderung – diese wird auch als Ruck bezeichnet – des Fahrzeugs im vorherigen Zeitpunkt $k-1$ beschreiben. Die Länge des Sample-Intervalls ist genau die Zeitdauer $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ zwischen den Zeitpunkten k und $k-1$.

Das Kalman-Filter benötigt zur Prädiktion der Bewegung ein entsprechendes Modell für das Fahrzeug.

Gute Ergebnisse wurden mit der Annahme einer konstanten Beschleunigung und dem Ruck als Prozessrauschen erzielt [4]. Dies führt zu der Systemgleichung

$$x_k = x_{k-1} + \Delta t \cdot v_{k-1} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot a_{k-1} + \frac{1}{6} \Delta t^3 \cdot w_{k-1}, \quad (\text{A.9})$$

worin w_{k-1} als weißes Gauß'sches Prozessrauschen angenommen wurde. Das allgemeine Systemmodell des Kalman-Filters wird beschrieben durch

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A} \mathbf{y}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{W} w_{k-1}, \quad (\text{A.10})$$

worin \mathbf{A} die Systemmatrix ist und der Zustandsvektor

$$\mathbf{y}_k = (x_k, v_k, a_k)^T \quad (\text{A.11})$$

aus den Zustandsvariablen Zugposition x_k , Geschwindigkeit v_k und Beschleunigung a_k besteht. Die Umformung von Gleichung (A.9) zum Einsetzen in das allgemeine Systemmodell aus Gleichung (A.10) führt zu

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}_k} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} x_{k-1} \\ v_{k-1} \\ a_{k-1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}_{k-1}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{6}\Delta t^3 \\ \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t \end{pmatrix}}_{\mathbf{W}} w_{k-1}. \quad (\text{A.12})$$

Da das verwendete Messsystem keine Informationen über Bedienhandlungen des Triebfahrzeugführers liefert bzw. erfasst, kann keine Vorhersage über die Beschleunigungsänderung getroffen werden. Somit enthält das Systemmodell keinen zusätzlichen Eingang \mathbf{u}_{k-1} und die Steuerungsmatrix \mathbf{B} wird zu $\mathbf{0}$. Die Rauschmatrix

$$\mathbf{W} = \left(\frac{1}{6}\Delta t^3, \frac{1}{2}\Delta t^2, \Delta t \right)^T \quad (\text{A.13})$$

beschreibt den Einfluss des Systemrauschens w_{k-1} auf die einzelnen Zustandsgrößen gemäß Gleichung (A.9).

Durch eine Änderung des Systemmodells kann das Kalman-Filter auch an andere Gegebenheiten angepasst werden. Hierauf wurde in Abschnitt 2.5.3 eingegangen.

A.3.2 Beobachtungsmodell

Das Beobachtungsmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Zustandsvektor \mathbf{y}_k des Systems, welcher auch aus nicht direkt messbaren Größen bestehen kann, und dem Messvektor \mathbf{z}_k , in dem die gemessenen Größen – hier die mit dem Korrelator ermittelte Laufzeit und die Maximumfrequenzen – enthalten sind. Somit kann der in \mathbf{y}_k enthaltene Systemzustand mithilfe der Beobachtungsmatrix \mathbf{H} in den Messvektor

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{y}_k + \nu_k, \quad (\text{A.14})$$

transformiert werden, wobei zur Modellierung der Messunsicherheit ein Messrauschen ν_k additiv überlagert wird.

Im vorliegenden Fall beinhaltet der Messvektor \mathbf{z}_k drei Messungen, welche aus den Sensorsignalen des Wirbelstrom-Sensors gewonnen werden:

$$\mathbf{z}_k = \left(\frac{1}{T_{\text{clc}}}, f_{0,1}, f_{0,2} \right)^T. \quad (\text{A.15})$$

Die erste Komponente des Messvektors ist indirekt die Geschwindigkeit v_{clc} , welche mithilfe des CLC berechnet wird (siehe Abschnitt 2.3.1):

$$v_{\text{clc}} = \frac{l}{T_{\text{clc}}} . \quad (\text{A.16})$$

Die anderen beiden Komponenten ergeben sich aus der Frequenzanalyse der Schwellenfrequenz. Hierbei wird jeder Sensorkanal individuell analysiert, somit ergeben sich die Geschwindigkeiten aus den Sensorkanälen 1 und 2 zu

$$v_{\text{Freq},1} = f_{0,1} \cdot \bar{x}_{\text{cl}} \quad \text{bzw.} \quad (\text{A.17})$$

$$v_{\text{Freq},2} = f_{0,2} \cdot \bar{x}_{\text{cl}} . \quad (\text{A.18})$$

Eine Kombination der obigen Gleichungen führt zur Messgleichung des Gesamtsystems

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{T_{\text{clc}}} \\ f_{0,1} \\ f_{0,2} \end{pmatrix}}_{\mathbf{z}_k} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{x}_{\text{cl}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{x}_{\text{cl}}} & 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{pmatrix} x_k \\ v_k \\ a_k \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}_k} + \nu_k , \quad (\text{A.19})$$

mit dem als weißem Gauß'schem Rauschen angenommenen Messrauschen ν_k . Aus der Form der Beobachtungsmatrix \mathbf{H} wird deutlich, dass in die Messung nur die Fahrzeuggeschwindigkeit eingeht, da nur die zweite Spalte besetzt ist. Die Varianzen jeder Messung ergeben sich aus der Kovarianzmatrix

$$\mathbf{R}_k = E \{ \nu_k \cdot \nu_k^T \} \quad (\text{A.20})$$

der einzelnen Beobachtungen, wobei nur die Diagonalwerte

$$\text{diag}(\mathbf{R}_k) = (\sigma_{\text{clc}}^2, \sigma_{\text{Freq},1}^2, \sigma_{\text{Freq},2}^2) . \quad (\text{A.21})$$

besetzt sind. Dies bedeutet, dass die Störungen der einzelnen Messgrößen als unkorreliert angenommen werden. Dies wird durch die Tatsache gerechtfertigt, dass die Geschwindigkeitswerte mit den unterschiedlichen Verfahren Korrelation und Frequenzanalyse gewonnen werden, bzw. dass die Sensorkanäle mit unterschiedlichen Frequenzen betrieben werden, so dass sich Störungen von außen in der Regel nur in einem Sensorkanal bemerkbar machen¹.

¹Gemäß Gleichung (2.21) wären die Varianzen der aus der Frequenzanalyse gewonnenen Geschwindigkeiten streng genommen als korreliert zu betrachten, da der Parameter für den Schwellenabstand \bar{x}_{cl} sich direkt auf beide Kanäle auswirkt. Allerdings wurde in Abschnitt 2.4.2.4 gezeigt, dass dieser Einfluss zum einen konstant ist und zum anderen die Güte der Messung wesentlich von der Signalqualität abhängt.

A.3.3 Das Kalman-Filter

Die Signalverarbeitung im Kalman-Filter lässt sich in zwei logische Schritte aufteilen. Zunächst wird aus dem letzten Ergebnis im sogenannten Prädiktionsschritt ein neuer Zustand vorausgesagt. In diese Voraussage gehen die dynamischen Eigenschaften des betrachteten Systems ein. Im darauf folgenden sogenannten Innovationsschritt wird dann die Prädiktion mit der aktuellen Messung verglichen. Im Kalman-Filter laufen diese beiden Schritte im ständigen Wechsel jeweils nacheinander ab.

A.3.3.1 Prädiktionsschritt

Im Prädiktionsschritt wird zunächst aus dem letzten bekannten Zustand $\hat{\mathbf{y}}_{k-1}$ mithilfe der Systemmatrix \mathbf{A} der neue Zustand

$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = \mathbf{A} \hat{\mathbf{y}}_{k-1} \quad (\text{A.22})$$

geschätzt.

Die prädizierte Kovarianzmatrix

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{W} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{W}^T \quad (\text{A.23})$$

berechnet sich aus der Kovarianzmatrix \mathbf{P}_{k-1} des vorherigen Schrittes zu der die Rauschmatrix \mathbf{W} addiert wird. \mathbf{Q}_{k-1} wird, da keine weiteren Einflüsse auf das Systemrauschen bekannt sind, als Diagonalmatrix angenommen und ergibt sich mit dem konstanten Rauschfaktor σ_{System} zu

$$\mathbf{Q}_{k-1} = \sigma_{\text{System}}^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.24})$$

A.3.3.2 Innovationsschritt

Im Innovationsschritt wird der prädizierte Zustand mit dem tatsächlich gemessenen Zustand abgeglichen. Die Gewichtung zwischen der Schätzung aus den vergangenen und den neuen Messwerten wird über den sogenannten *Kalman-Gain*

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (\text{A.25})$$

festgelegt.

Aus dem prädizierten Zustandsvektor $\hat{\mathbf{y}}_k^-$ und der mit dem *Kalman-Gain* \mathbf{K}_k gewichteten Differenz aus dem Messwertvektor \mathbf{z}_k und der Prädiktion $\mathbf{H} \mathbf{y}_k^-$ ergibt sich die neue Zustandsschätzung

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \hat{\mathbf{y}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \mathbf{y}_k^-). \quad (\text{A.26})$$

Die zu $\hat{\mathbf{y}}_k$ zugehörige Kovarianz ist durch

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (\text{A.27})$$

zu berechnen, wobei \mathbf{I} die Einheitsmatrix bezeichnet. Zu jeder Schätzung für den Fahrzeugzustand wird somit immer auch eine Aussage über die Messgüte getroffen.

Das hier gezeigte Systemmodell ist speziell auf die Anwendung im spurgebundenen Verkehr abgestimmt, bei dem sich das Problem der Ortung auf die Angabe einer Entfernung, also einer 1D-Position, beschränkt. Die Einbindung von Daten einer 2D-Positionsmessung, z. B. von GPS-Messungen, erfordert eine entsprechende Erweiterung des Bewegungsmodells auf mehr Dimensionen, wie sie z. B. in [4, 62] beschrieben wird.

Institut für Mess- und Regelungstechnik Universität Karlsruhe (TH)

Zur Realisierung einer sicherheitsrelevanten Ortung von Schienenfahrzeugen werden zunehmend bordautonome Verfahren gegenüber streckenseitigen bevorzugt, da letztere stets aufwendige und damit kostenintensive Installationen an der Strecke erfordern. Wirbelstrom-Sensoren erfüllen die Messaufgaben Geschwindigkeitsmessung und absolute Positionsmessung und ermöglichen somit die Realisierung einer rein bordautonomen Ortung von Schienenfahrzeugen. Die Geschwindigkeitsmessung basiert dabei auf zwei diversitären Verfahren, zum einen auf der Laufzeit-Korrelation und zum anderen auf der Frequenzanalyse der Sensorsignale. Durch die Fusion der Messwerte mittels eines Kalman-Filters wird insbesondere die Verfügbarkeit der Messung gesteigert.

Mit Wirbelstrom-Sensoren lassen sich Weichen und Weichenbauteile detektieren und klassifizieren. Hierfür wird ein statistisches Modell erstellt. Mit einem Bayes-Klassifikator wird anhand von Messdaten die robuste Klassifikation von Weichen gezeigt. Anhand eines geeigneten Modells der Strecken-Infrastruktur lässt sich dann der Fahrweg eines Schienenfahrzeugs gleisgenau nachvollziehen. Zur Modellierung wird ein Hidden-Markov-Modell verwendet, welches auch die statistischen Einflüsse auf die Klassifikation berücksichtigt.

Die Wirbelstrom-Sensorik besitzt wegen ihrer Vielseitigkeit die Möglichkeit, die Messgrößen Geschwindigkeit und Position redundant mit teilweise diversitären Verfahren zu bestimmen. Daher eignet sie sich besonders zum Einsatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen.