



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Sektion Cleantech

**Schlussbericht** vom 24.01.2017

---

# Systemtest Stromabnehmersystem für Oberleitungsbus zur Energieeinsparung

---



© K+M 2016



**Datum:** 24.01.2017

**Ort:** Zürich

**Subventionsgeberin:**

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das  
Bundesamt für Energie BFE  
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger:**

Kummler + Matter AG  
Hohlstrasse 188  
8004 Zürich  
[www.kuma.ch](http://www.kuma.ch)

**Autoren:** Lukas Erne, Kummler + Matter AG, Stadtverkehr, [lukas.erne@kuma.ch](mailto:lukas.erne@kuma.ch)  
Simon Geiger, Kummler + Matter AG, Entwicklung, [simon.geiger@kuma.ch](mailto:simon.geiger@kuma.ch)  
Dennis Darra, Kummler + Matter AG, Technologie, [dennis.darra@kuma.ch](mailto:dennis.darra@kuma.ch)

**BFE-Programmleitung:** Dr. Men Wirz, Sektion Cleantech, [men.wirz@bfe.admin.ch](mailto:men.wirz@bfe.admin.ch)  
**BFE-Projektbegleitung:** Martin Pulfer, Sektion Energieforschung, [martin.pulfer@bfe.admin.ch](mailto:martin.pulfer@bfe.admin.ch)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501376-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Mit den in 2016 erstellten Stromabnehmer Prototypen (vgl. Abb. 2.1) sowie den Versuchen auf dem Fahrzeug in Biel konnten erfolgreich weitere wichtige Erfahrungen für das Entwicklungsprojekt gesammelt werden. Die technische Machbarkeit sowie die Funktion der Steuerung und Komponenten u.a. der stereooptischen Erkennung ist dokumentiert und bestätigt worden.

Während der Testtage in Biel als auch auf der eigens dafür errichteten Testanlage in Zürich konnten weitere wichtige zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden und notwendige Anpassungen ausgelöst werden. So konnten nun zum Beispiel unterschiedliche Lichtverhältnisse berücksichtigt werden. Daneben konnten Situationen mit diversen Fahrdrähtanordnungen im Zusammenhang mit Gebäudesilouetten getestet werden.

Der Systemtest zeigt jedoch auch, dass die von den Kunden geforderte System-Verfügbarkeit von 99% über alle Eindrahtungen bisher noch nicht erreicht werden konnte. Um dieser Forderung gerecht zu werden, sind neben Softwareanpassungen auch weitere zusätzliche technische Entwicklungsschritte und Anpassungen an der Basismechanik erforderlich. Über die Fortsetzung des Entwicklungsprogrammes ist daher mit einem angepassten Business Case gesondert zu entscheiden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Ausgangslage</b> .....	<b>6</b>
<b>Ziel des Projektes</b> .....	<b>7</b>
<b>Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
<b>Konzept</b> .....	<b>10</b>
<b>Vorgehen</b> .....	<b>11</b>
LibroDuct auf Trolleybuss.....	11
LibroDuct auf Testträger.....	13
Testplanung.....	14
<b>Ergebnisse</b> .....	<b>16</b>
<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>20</b>
<b>Entwicklungskosten</b> .....	<b>20</b>
<b>Ausblick</b> .....	<b>21</b>
<b>Anhang</b> .....	Fehler! Textmarke nicht definiert.



## Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
Kuma, K+M	Kummler + Matter AG
PT	Prototyp
MA	Mitarbeiter
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich



## Ausgangslage

Kummler + Matter entwickelt in Kooperation mit den Softwareunternehmen DiaLOGIKa seit 2012 ein Stromabnehmersystem für Trolleybusse, das die modernen betrieblichen Aspekte beim Trolleybus stärker unterstützt, als herkömmliche Systeme.

LibroDuct ermöglicht das vollautomatische An- und Abdrahten von Trolleybussen (Oberleitungsbussen). Mittels stereooptischer Objekterkennung werden die Positionen der Stromabnehmerstangen (kurz: Stangen), Stromabnehmerkontakte (kurz: Stromabnehmerschuhe oder Schuhe) und der Oberleitung erkannt. Dadurch wird deren Abstand direkt in einem Verfahren gemessen und aufwendige Abgleicharbeiten sowie Zusatzaufbauten entfallen.

Trolleybusse, die durch Batterien (oder durch eine APU – Auxiliary Power Unit) ergänzt werden, werden durch LibroDuct unabhängig von flächendeckender Oberleitung.

Umgekehrt erhalten Batteriebusse die Möglichkeit, auf der Strecke nachzuladen, was die benötigte Batteriekapazität drastisch reduziert. Oberleitungsbusse können dadurch bei vorhandener Infrastruktur effizient und sparsam mit Energie versorgt werden. Vorhandene Fahrzeuge benötigen keine oder nur geringe Anpassungen. LibroDuct könnte somit eine optimale Ergänzung der Fahrzeuge sein, welche im Leuchtturmprojekt „Swiss Trolley Plus“ in Zürich erprobt werden <https://www.swisstrolleyplus.ch/de/>.

Der Oberleitungsbau kann durch LibroDuct kostengünstig auf Haupttrouten und baulich einfache Situationen beschränkt werden oder auch nur auf einige Haltestellen und Strecken mit hohem Strombedarf (Steigungsstrecken).

Die Busse können sich flexibel von der Stromversorgung abkoppeln und autark Strecken oder – je nach Batteriekapazität längere oder kürzere – Zwischenstrecken befahren.

Die vorhandene Oberleitung muss nicht modifiziert werden. Durch eine genau auf das Problem zugeschnittene Regelung werden die Stangen in kürzester Zeit an die Oberleitungen geführt.

Der Busfahrer ist nicht mehr gezwungen, aus dem Bus auszusteigen und die Stromabnehmer manuell aufzudrahten. LibroDuct führt die Aufdrahtung vollautomatisch durch. Der Fahrer kann sich auf den Verkehr und die Passagiere konzentrieren und hat einen Bedienkomfort, der mit dem eines Dieselmotors vergleichbar ist. Zeitverzug und Verletzungsgefahr beim Aufdrahten werden vermieden und die Sicherheit wird erhöht.



## Ziel des Projektes

Die Prototypentests auf einem Bus der Bieler Verkehrsbetriebe und einem Flachhänger als Testbench haben mehrere Ziele verfolgt:

In erster Linie sollte die Funktionalität des Systems nachgewiesen werden. Hierzu wurden diverse Funktionstests durchgeführt, die die Funktionalität an und für sich nachweisen sollte und über die Verfügbarkeit auch die Qualität der Funktionalität. Ziel hierbei war eine Verfügbarkeit von über 95%, das bedeutet dass mindestens 95% der Aufdrahtvorgänge erfolgreich, sprich mit Andrahtung, abgeschlossen werden. Hierzu zählt auch die Erkennung der Fahrdrähte durch die stereooptische Objekterkennung als erster operativer Schritt des Systems.

Mit inbegriffen bei diesem Ziel war eine Systemerprobung in diversen Betriebssituationen, sowohl was die Aufdrahtung betrifft, als auch was die Haltbarkeit des Systems im aufgedrahteten Zustand betrifft, wenn also mechanische Kräfte und Umwelteinflüsse auf das System einwirken und es beanspruchen.

Die Tests dienten also genauso auch als Erfahrungssammlung über das System, aber auch über die Bedienung. Das Kundenfeedback bezüglich der bereitgestellten Funktionen und der Initialisierung dieser Funktionen stellte ein Novum in der Entwicklung dar, da mit den Prototypen ein erster Stand vorhanden ist, der von Kunden in natura untersucht werden kann, wodurch diverse Funktionalitäten erstmals Diskussionsbedarf erhalten.

Zusammenfassend können die Ziele neben der Validierung als Erkennen von Verbesserungspotential beschrieben werden.

Ein letztes Ziel stellte die Prüfung der Schnittstellen und Schnittstellenfunktionen dar. Der Aufbau des Systems auf einem modernen Bus der Verkehrsbetriebe Biel sollte Probleme bei der Implementierung der Hardware, als auch der Software aufzeigen, um bei einer Serienproduktion ein System für alle Oberleitungsbus- Typen bereitstellen zu können.



## Grundlagen

Auf dem Gebiet der Elektrobusse im Allgemeinen und der Ladeinfrastrukturen im Speziellen gilt es noch immer einige Aufgaben zu lösen. In den vergangenen Jahren wurden grosse Fortschritte gemacht. Trotzdem beschäftigt das Thema: „wie bringen wir die benötigte Energie schnell, sicher und zuverlässig ins Fahrzeug“ ganze Industriezweige.

Mit einem Oberleitungsbus (auch O-Bus oder Trolleybus genannt) und einer Oberleitung kommt die Frage gar nicht erst auf. Die dauernde Stromversorgung erspart ihm die teilweise sehr grossen und schweren Batterien oder anderen elektrischen Energiespeicher. Busse, welche beispielsweise nur punktuell an den Haltestellen aufgeladen werden, brauchen abhängig von Streckenlänge und -topographie teure Speicher mit viel Masse. Dass Batterien zur Erreichung einer sinnvollen Lebensdauer nur in einem festgelegten Bereich der Kapazität betrieben werden, verstärkt das Problem noch zusätzlich. Zudem benötigt das Aufladen an Haltestellen und/oder Endkehren viel Zeit. Je nach System, Streckenlänge, Anzahl Stationen etc. kann die zusätzlich benötigte Zeit schnell 7, 10 oder gar noch mehr Minuten betragen. In ungünstigen Fällen kann dies bedeuten, dass ein zusätzliches Fahrzeug die Strecke bedienen muss um die gleiche Kapazität wie mit einem herkömmlichen Trolleybus zu erreichen.

Ein Elektro-Bus, welcher nicht an den Haltestellen aufgeladen wird, sondern während der Fahrt, löst diese beiden Probleme. Er braucht einen wesentlich kleineren Speicher, da die speisungslose Strecke insgesamt kleiner gestaltet werden kann, und er verliert an den Haltestellen keine Zeit mit Aufladen. Bauliche Massnahmen für eine Ladeinfrastruktur entfallen, da die vorhandenen bewährten Oberleitungen verwendet werden.

**Mit LibroDuct können Oberleitungsbusse ihre Stromabnehmer ortsunabhängig und automatisch mit der Fahrleitung (Oberleitung) verbinden, d.h. an- und abdrahten. Dadurch wird das Anwendungsspektrum und die Flexibilität von Oberleitungsbussen deutlich erweitert und es werden folgende Vorteile generiert:**

- Gegenüber reinen Batterielösungen genügen kleinere und leichtere Batterien (Energie- und Ressourcen-Einsparung). Lange Ladezeiten an fixen Ladestellen werden dadurch überflüssig. Die Umweltbelastung durch Batterieherstellung, -wartung und Entsorgung werden reduziert.
- Gegenüber reinen Oberleitungslösungen können im Batteriebetrieb auch fahrleitungsfreie Strecken befahren werden, die heute von Dieselnissen bedient werden. Emissionen werden somit reduziert oder vermieden. Taktzeiten können gesteigert werden und die Attraktivität des ÖV mit seinen energetischen Vorteilen nimmt zu. Der elektrische Oberleitungsbusbetrieb wird wirtschaftlicher. Es wird weniger neue Infrastruktur benötigt, was Energie und Kosten spart
- Durch ein optionales Energiemanagement können so ausgestattete Fahrzeuge gespeicherte oder durch Bremsen erzeugte Energie an andere Busse abgeben. Insbesondere auf steigungsreichen Strecken werden dadurch Energieeinsparungen von bis zu 25% erwartet.



Die Grundidee für das neue „LibroDuct“ System wurde bereits im Jahr 2011 geboren und die Entwicklung wurde 2012 gestartet. Nach einer Machbarkeitsstudie entstand ein erstes Konzept des Stromabnehmersystems, das Funktionsmuster. Dieses Funktionsmuster wurde im Sommer 2014 bei den Verkehrsbetrieben Zürich (VBZ) erstmalig getestet.

Die daraus gewonnenen Erfahrungen wurden genutzt, um weitere Verbesserungen an Software und Hardware umzusetzen. Durch ein neues Designkonzept sowie vielfältigen mechanischen Simulationen und Berechnungen entstand eine 2. Version der Stromabnehmerbasis, der Prototyp.

Gefertigt wurden insgesamt 3 Prototypen, um diverse Tests durchzuführen zu können. Ein Prototyp kam bei der Firma DiaLOGIKa in Saarbrücken zum Einsatz. Mithilfe dieses Prototyps wurde die Software an die mechanischen Gegebenheiten und verbauten Aktoren angepasst und weiterentwickelt.

Auf einem festen Prüfstand mit einfacher mobiler Oberleitung, wurden ebenfalls die ersten Tests bezüglich Funktionalität und Verfügbarkeit durchgeführt. Aufgrund der starren Montierung und der daraus resultierenden Einseitigkeit der Tests insbesondere der Bewegungseinschränkungen sowie der fixen optischen Ausrichtung konnten hier nur begrenzte Aussagen bezüglich der Verfügbarkeit bei unterschiedlichen Stand- und Lichtverhältnissen getroffen werden.

Hier setzen die im Folgenden Beschriebenen Testreihen direkt auf Fahrzeugen beziehungsweise auf dem Flachhänger an.



## Konzept

LibroDuct ist aufgebaut wie herkömmliche Stangenstromabnehmersysteme, jedoch mit einem Steuerungssystem, das sich verschiedene softwaregestützte Verfahren zunutze macht. In der Kombination mit neuen mechanischen Komponenten des Stromabnehmersystems wird der automatische Wechsel zwischen Fahren mit Oberleitung und dem Fahren ohne Oberleitung ermöglicht.

LibroDuct besitzt je Stromabnehmerstange eine Basis mit Elektromotor für die Drehung, einem Motor für das Anheben, einem Pneumatikzylinder für den Anpressdruck und der Stromabnehmerstange mit Stromabnehmerkopf. Zusätzlich sind zwei Kameras und ein Rechnersystem installiert, welches die Informationen verarbeitet und die Aktuatoren steuert.

Die Positionsbestimmung von Oberleitung und Stromabnehmer erfolgt mittels der beiden digitalen Kameras, bei Bedarf mit Beleuchtung, über stereooptische Mustererkennung. Die Rechnersysteme steuern dann die Elektromotoren entsprechend an, so dass die Stromabnehmerköpfe zu den errechneten Andrahtpunkten an die Fahrdrähte fahren. Die Fänger an den Stromabnehmerköpfen erhöhen den Fangbereich.

Sind die Köpfe an den Fahrdrähten angelangt, wird der Anpressdruck über die pneumatischen Zylinder auf die Stangen gegeben. Damit klappt der Kohlenträger in die horizontale Position und die Fänger klappen nach hinten. So können auch weiterhin Weichen, Kreuzungen und andere Armaturen ohne Anpassung befahren werden.

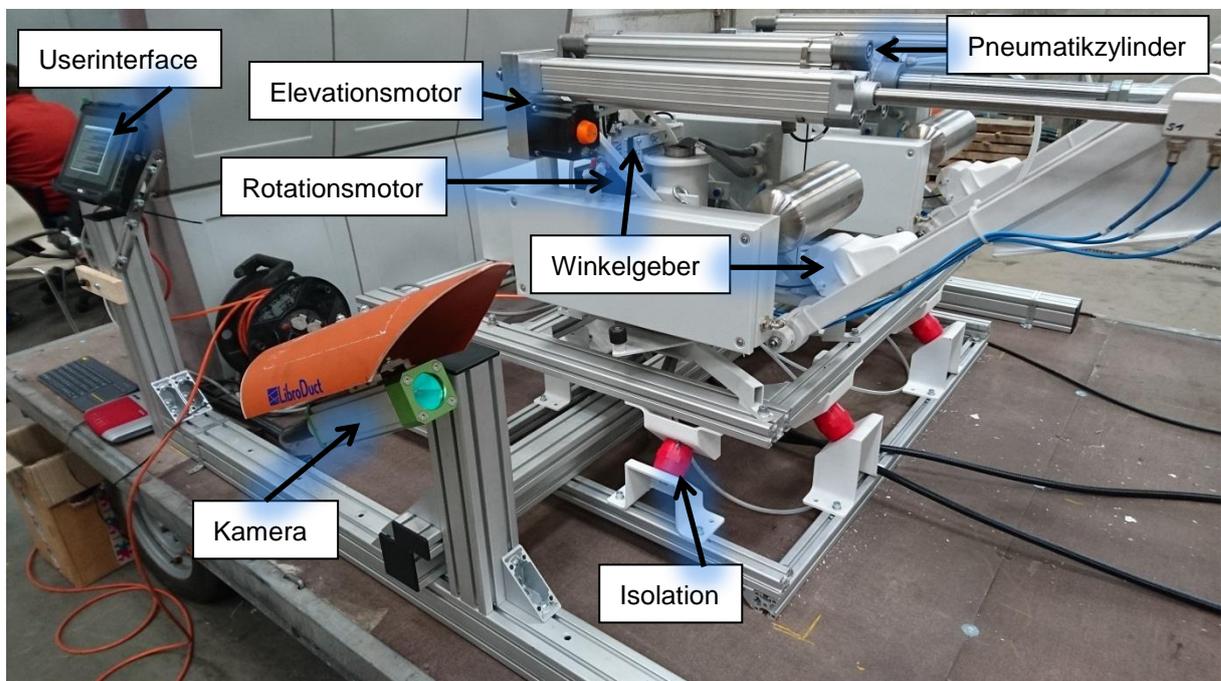


Abb. 1 LibroDuct im Detail

## Vorgehen

### LibroDuct auf Trolleybus

Zur Erprobung im Feld wurde ein PTtyp auf einem Bus der Bieler Verkehrsbetriebe montiert. Hierzu wurde ein Bus vom Typ BGT – N2 von NAW/Hess verwendet, der serienmässig ein Stromabnehmersystem des Herstellers Vossloh-Kiepe verwendet. Ziel war die Nachweiseerbringung für die Funktionalitäten und die Ermittlung der Verfügbarkeiten des neuen Systems anhand von standardisierten Tests in einem separierten Teil des Oberleitungsnetzes. Im Anschluss sollten Dauerfestigkeit, Funktionen und Bedienung im regulären Betrieb von den Verkehrsbetrieben auf Verbesserungen und Schwachstellen geprüft werden.



Abb. 2 Prototyp LibroDuct auf Trolleybus

Problematisch war hier von Anfang an die Montage auf einem bestehenden System (siehe Abb.1). Aufgrund vom bestehenden Aufbau musste LibroDuct auf eine Weise integriert werden, die der Geometrie, sowohl mechanisch, als auch softwareseitig nicht zuträglich war. Eine Verschiebung nach hinten in Fahrtrichtung zur einwandfreien Montage verlangte eine Kürzung der Stromabnehmerstangen und mehrere Umbauten an den Stromabnehmerbasen selbst. Daraus resultierte ein deutlich steilerer Winkel der Stromabnehmerstangen im angedrahteten Modus.



Dies hatte zur Folge, dass die Kalibrierung überarbeitet werden musste und der Bus nicht die Berechtigung erhielt, im regulären Oberleitungsnetz eingesetzt zu werden.

Auch die Tests im separierten Teil des Oberleitungsnetzes erzielten, unter anderem aufgrund der geänderten Geometrie, nicht die erhofften Resultate. Durch den Zeitverlust durch die schwierige Montage und die nötigen Anpassungen sowie der Tatsache, dass die Bieler Verkehrsbetriebe den Bus mit verbautem LibroDuct nicht im regulären Einsatz einsetzen konnten, musste dieser zurückgebaut werden, bevor alle Tests abgeschlossen werden konnten.

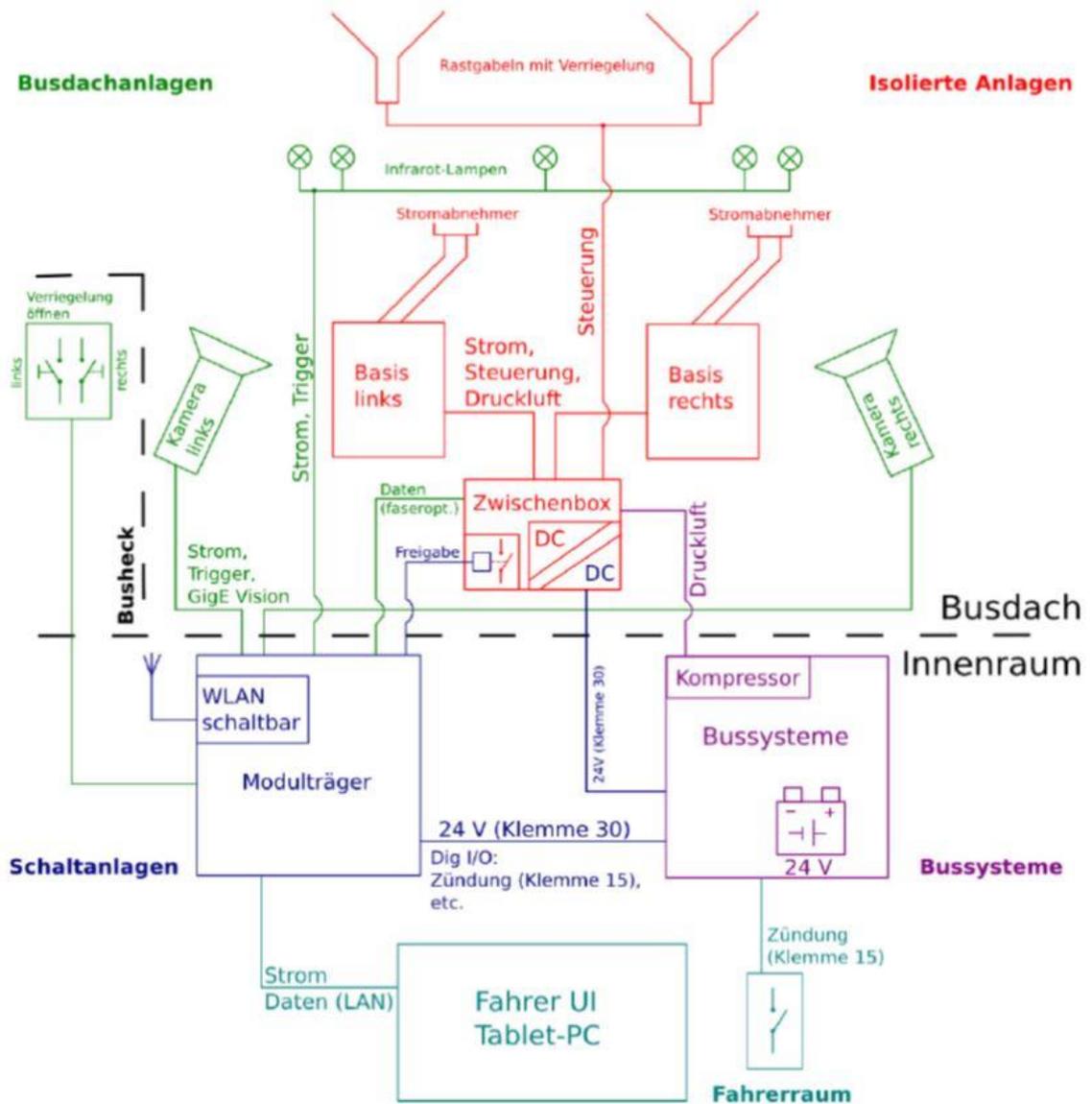


Abb. 3 Schema LibroDuct auf Busdach

## LibroDuct auf Testträger

Nachdem die Prototypentests in Biel unter anderem auf Grund der geringen Verfügbarkeit des Gesamtsystems insbesondere der Basis nicht erfolgreich war, sind weitere mechanische Veränderungen und Verbesserungen vorgenommen worden. Vor dem Hintergrund der Testergebnisse von Biel wurde deshalb beschlossen, die Tests zunächst auf einer eigenen Testanlage durchzuführen. Ein wesentlicher Grund war neben dem Reifegrad einem Vertrauensverlust bei involvierten Kunden vorzubeugen. Durch diese internen Tests sollte die Stabilität und Verfügbarkeit des Systems objektiv nachgewiesen werden. Im Laufe dieser Tests sollten ausserdem die genaue Funktion der Software geprüft, aber auch die K+M MA mit der Anlage und der Bedienung noch mehr vertraut werden.

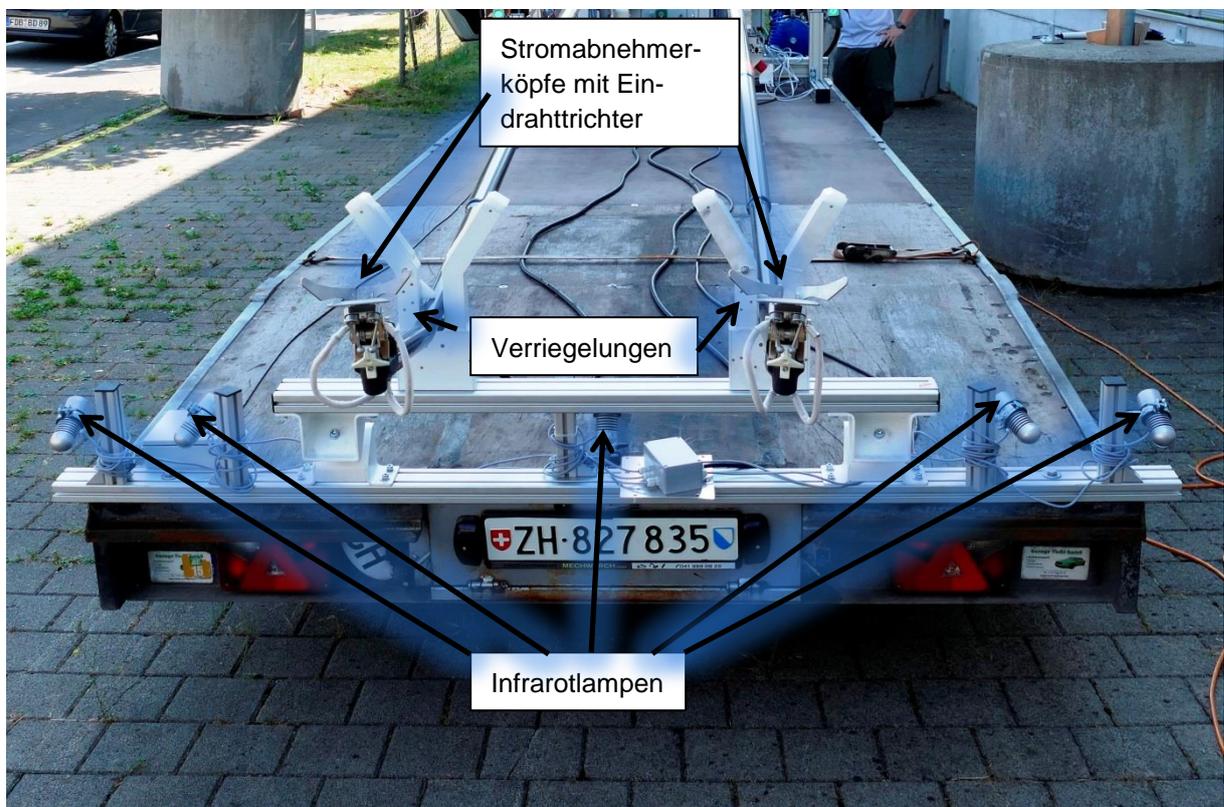


Abb. 4 LibroDuct Verriegelung und Infrarotbeleuchtung

Für die Realisierung dieser Aufgabe wurde ein Testträger konzipiert, beschafft und anschliessend bei K+M aufgebaut. Damit konnte eine permanente Zugänglichkeit bei genügender Mobilität gewährleistet werden. Dies sollte die Handhabung erleichtern, nachdem in der Vergangenheit bei Tests immer wieder Nachbesserungen auf den Fahrzeugen durchgeführt werden mussten. Die Montage auf dem Fahrzeugdach erschwerte die Zugänglichkeit oder kurzfristige Adaptation am System in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort zum Teil erheblich.



Abb. 5 Prototyp LibroDuct Testbench

Um die Funktionalität des Prototypensystems möglichst realistisch durchzuführen und gleichzeitig verschiedene Gelände- und Fahrleitungssituationen, als auch unterschiedliche Licht und Wetterbedingungen zu prüfen, wurde für den Test ein strom- und gefahrenloser Fahrleitungsabschnitt mit Masten und Auslegern und zwei parallele Linien errichtet.

## Testplanung

Sowohl für die Feldversuche mit Trolleybussen, als auch die Versuche auf dem Testträger sollte ein vorgefertigtes Protokoll den Tests Struktur geben. Hierzu wurden Testfälle konzipiert, die sowohl die Einzelfunktionen, als auch die Hauptfunktionen abbilden. Grundlage für das Testprotokoll war das Pflichtenheft, dessen Anforderungen in Testfälle umgewandelt wurden.

In den Einzelteilstests geht es darum, alle einzelnen Teilbereiche auf ihre Funktion zu prüfen. Das betrifft sowohl die mechanischen Bauteile, als auch die elektrischen, pneumatischen und im speziellen auch diverse Softwarefunktionen wie bspw. Fahrdrähterkennung und Winkelerfassung. Zum Test des Prototyps werden nur die bereits umgesetzten Funktionen geprüft, die eine Notwendigkeit gegenüber dem Auf- und Abdrahtens im Stand darstellen.

Die Hauptfunktionstests prüfen auf Mindestanforderungen der Norm EN 50502 beim Aufdrahten und Abdrahten. Hierbei wird die relative Lage der Oberleitung zum Aufbau auf dem Trolleybus berücksichtigt. Diese relative Lagen können als standardisierte Positionen für normierte Zustände angesehen werden.



TA Test- und Ab- nahmeprotokoll		IBS LibroDuct		Kummer-Mattler				
<b>3 System- und Funktionstests des Prototypen</b>								
Bei den System- und Funktionstests wird das gesamte System durch den Projektleiter und die Fachspezialisten betreffend allen Anforderungen geprüft (Komponenten wie einzelne Module, Bauteile, Schnittstellen und Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten, funktionale und nicht funktionale Anforderungen). Dieser Test findet zuerst in einer Testumgebung statt und wird mit Testdaten durchgeführt. Die Testumgebung soll die Produktumgebung simulieren. Später wird der Test auf ein öffentliches Überleitungsnetz ausgeweitet.								
Zum Abgleich mit dem Pflichtenheft ist die entsprechende Nummer im Feld „Anforderungskriterium“ rechts unten vermerkt. Im Feld „Vorgabe“ ist die Prüfungsart hinterlegt und ein Zahlencode, der die Priorität, die Testläufe und geforderte Verfügbarkeit angibt:								
x/yyyy/zzz								
x -	Priorität	Prioritäten:	1 -	muss getestet werden				
y -	Testläufe		2 -	kann getestet werden (bei ausreichend Zeit)				
z -	Verfügbarkeit		3 -	Langzeitbeobachtung				
			4 -	Labortest				
<b>3.1 Obligatorische Einzelteilstests (Priorität 1)</b>								
In den Einzelteilstests geht es darum alle einzelnen Teilbereiche auf ihr Funktion zu prüfen. Das betrifft sowohl die mechanischen Bauteile, als auch die elektrischen, pneumatischen und im speziellen auch diverse Softwarefunktionen wie bspw. Fahrdrahterkennung und Winkelerfassung. Zum Test des Prototyps werden nur die bereits umgesetzten Funktionen geprüft, die eine Notwendigkeit gegenüber des Auf- und Abdrahtens im Stand darstellen.								
Nr.	Vorgabe	Testfall	Anforderungskriterium	FuMu	Phase 1	Phase 2	Visum	Test OK (OK/ NOK)
Mechanische und elektrische Vortests								
1.	Isolationsprüfung 1/001/001	Isolierung Montagerahmen CLC/TS 50502 5s bei 3,5kV bis 6mA	Grundplatte / Fahrzeug muss gegenüber Montagerahmen elektrisch isoliert sein. 3.4.1.5	✓	n. g.			
Kultu ESK Autor: geisi		Release: geisi	File: TA_IBS_Proto_LibroDuct_Testbench.docx / 05.10.2016	Entwicklung & Konstruktion Page: 9/31				

Abb. 6 Beispielseite Testprotokoll Einzelfunktionstests

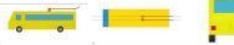
TA Test- und Ab- nahmeprotokoll		IBS LibroDuct		Kummer-Mattler				
<b>3.2 Hauptfunktionstests</b>								
Die Hauptfunktionstests prüfen auf Mindestanforderungen der Norm DIN CLC/TS 50502 beim Aufdrahten und Abdrahten. Hierbei wird die relative Lage der Oberleitung zum Aufbau auf dem Trolleybus berücksichtigt. Diese relative Lagen können als standardisierte Positionen für normierte Zustände angesehen werden. Beim ersten Test mit dem Funktionsmuster geschieht das Aufdrahten mit Hilfe eines Aufdrahttrichters an der Fahrleitung.								
<b>3.2.1 Hauptfunktionstests unter normierten Bedingungen</b>								
Gemäss der Norm DIN CLC/TS 50502 muss es möglich sein unter den in der Norm beschriebenen Bedingungen jederzeit Auf- und Abdrahten zu können. Mit den Hauptfunktionstests unter normierten Bedingungen soll sichergestellt werden, dass dies beim Prototyp gewährleistet ist.								
Nr.	Vorgabe	Testfall	Anforderungskriterium	FuMu	Phase 1	Phase 2	Visum	Test OK (OK/ NOK)
80.	Funktionskontrolle 1/100/090	LibroDuct ermöglicht das automatische Auf- und Abdrahten. Das Abdrahten ist an jeder Stelle möglich, das Andrahten an dafür vorgesehenen Stellen bzw. Bereichen im Überleitungsnetz.	Einschränkungen des Andrahtbereichs sind bspw. Kurven, Tunnel, Bereiche mit besonders starkem Versatz zwischen Bus und Oberleitung 4.1.1.1	x	x		geisi	NOK
81.	Funktionskontrolle 1/010/010	Fremde Leitungen (Tram, Abspannungen) werden als solche erkannt und es erfolgt keine Andrahtung an diese Leitungen.	Immer 4.1.1.2	x	x		geisi	NOK
Testfall		Anforderungskriterium		Datum	Visum		Test OK (OK/ NOK)	
3,2.1.1	Aufdrahten direkt unter Fahrdraht bei gegebener Fahrdrahthöhe in spezifizierter Zeit	Fahrdrahthöhe 6000mm innert 10s 		16.08.16	geisi		NOK	
Bem. zu 3.2.1.1: Fahrdrahterkennung ist nicht immer gegeben (nur ca. 60% der Überleitungen werden erkannt); mit Offset treffen Stromabnehmerköpfe zuverlässig die ausgewählte Oberleitung; durchschnittliche Andrahtdauer 11,5s								
Kultu ESK Autor: geisi		Release: geisi	File: TA_IBS_Proto_LibroDuct_Testbench.docx / 05.10.2016	Entwicklung & Konstruktion Page: 21/31				

Abb. 7 Beispielseite Testprotokoll Hauptfunktionstests



## Ergebnisse

Die Durchführung der Tests auf unserer unabhängigen Testanlage und eigenem Versuchsträger war insofern erfolgreich, da mehrere mechanische Probleme gelöst werden konnten. So wurden z.B. die Zahnräder der Winkelgeber nicht ausreichend befestigt, so dass eine zuverlässige Wiedergabe der Winkel nicht gegeben war. Mit dieser Anpassung konnte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Erkennung deutlich verbessert werden.

Des Weiteren wurde bei der Überarbeitung der Winkelgeber das Übersetzungsverhältnis geändert, was eine Softwareänderung mit sich brachte. Ausserdem musste ein Winkelgeber getauscht werden, da dieser einen starken Sinuslauf aufwies und so die Kalibrierung jeweils unbrauchbar machte.

Eine neue Erkenntnis bei den Funktionstests war, dass die Stromabnehmerstangen nicht den spezifizierten Elevationswinkel anfahren konnten. So konnte festgestellt werden, dass die Mechanik des Systems nicht den Bewegungsradius besass wie konzipiert und im Pflichtenheft gefordert. Das führte dazu, dass keine Entgleisungen detektiert werden konnten, da der Stangenwinkel schon im angedrahteten Zustand nahezu am Limit war. Die Ursache konnte somit geklärt werden. Dies war bei den Fahrzeugtests so nicht möglich und führte zu aufwändigen Fehleranalysen und Zeitverzögerungen.

Um das System selbstständig bedienen zu können, wurde vor den Testtagen das komplette System zusammen mit DLLOGIKA kalibriert und eine Schulung der Bedienung der Steuerung für die K+M MA durchgeführt.

Die Initialisierung des Systems gelang ohne weitere Probleme und so war LibroDuct innerhalb der vorgesehenen Zeit einsatzbereit. Zu Beginn zeigte sich jedoch, dass die Oberleitungen nicht zuverlässig erkannt wurden. Manche Fahrdrähte wurden gar nicht erkannt, andere wurden erkannt, aber scheinbar nicht zuverlässig, wodurch es schwer war, sie auszuwählen, da das entsprechende Symbol ständig verschwand oder wechselte. Auch eine manuelle Einstellung der Belichtungszeit und weitere Versuche die Zuverlässigkeit zu erhöhen führten in den überwiegenden Fällen nicht zur erhofften Verbesserung.

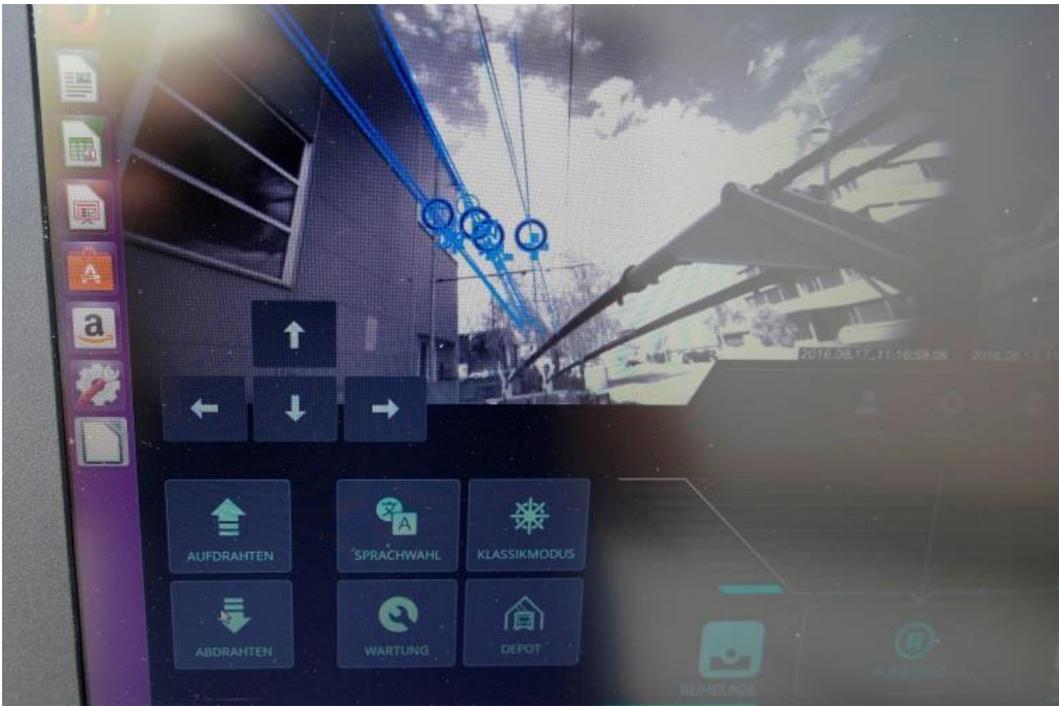


Abb. 8 Kamerabilder linke Seite auf Touch Panel



Abb. 9 Kamerabilder rechte Seite auf Touch Panel



Weitere erste Andrahtversuche liessen einen systematischen Fehler dafür annehmen, dass ein Andrahten der angewählten Fahrdrähte nicht erreicht werden konnte. Kurz vor der Aufdrahtung driften die Stromabnehmerköpfe jeweils nach rechts ab.

Nach eingehender Kontrolle konnte der Grund für den Drift in der elektrischen Spindel festgestellt werden, deren Angriffspunkt seitlich versetzt liegt und damit im unteren Bewegungsbereich (solange die Spindel zieht) ein Verzug am Gestell zustande kommt. Sobald die Stange nur noch von der Pneumatik angehoben wird (kurz vor dem Andrahten) schnellt die Stange dann nach rechts (in Fahrtrichtung).

Die Ursache für das Verfehlen der Fahrdrähte liegt demzufolge an der Stabilität der Basis, so dass dieser Verzug während der kompletten Kalibrierung bestand und damit die Stangen grundsätzlich ungenau positioniert werden. Mit einem Offset von  $-0.5\text{px}$  bei beiden Basen konnte dieser Fehler weitgehend eliminiert werden, was zu einer deutlich zuverlässigeren Positionierung führte.



Abb. 10 LibroDuct im aufgedrahtetem Zustand

Nach Beseitigung dieses Problems konnte mit den Hauptfunktionstests begonnen werden. Dafür wurde in der Vorbereitung eine ausführliche Testplanung einschliesslich einer Checkliste erstellt. Leider wurden auch hierbei wiederholt Problemen mechanischer Natur deutlich. Beispielsweise haben die Pneumatik-Ventile direkt am Zylinder regelmässig nicht geschaltet, wodurch sie offen blieben und kein Druck aufgebaut werden konnte. Dieses Problem konnte jeweils kurzfristig durch einen Schlag auf das Ventil behoben werden. Die Pneumatik muss daher in der folgenden Entwicklungsschleife grundsätzlich überarbeitet werden und die jeweiligen Komponenten auf ihre Eignung geprüft werden.



Im Verlauf zeigte sich ein weiteres Problem, welches verdeutlicht, dass die Festigkeiten der Basen noch nicht ausreichend ist. Aufgrund der Instabilität bzw. der zu geringen Systemsteifigkeit kam es zu Verklemmungen des Freilaufs. Daraus resultierten Detektions-Fehler in der Steuerungssoftware wodurch die Funktion „Abdrahten“ nicht mehr aufgerufen werden konnten.

Daraufhin wurde jedes Mal eine Notabdrahtung durchgeführt, die das Problem wahrscheinlich noch verschlimmerte, da die Stangen dann immer mit zusätzlicher Dynamik in den Freilauf gefallen sind und sich der Verzug dadurch vermutlich noch gesteigert wurde.

Bezüglich Verfügbarkeit wurde an den Haupttests bestätigt, was die frühen Versuche gezeigt haben: Wenn eine Oberleitung zuverlässig optisch erfasst und manuell ausgewählt wurde, liegt die Treffgenauigkeit bei nahezu 100%. Dies bei einer Stellung des Testträgers direkt unter der Oberleitung. Ob der Testträger dabei gerade in Fahrtrichtung oder etwas schräg zur Fahrtrichtung steht ist unerheblich.

Allerdings werden nur ca. 60% der Oberleitungen durch das optische System erkannt. Dementsprechend ist die reale Verfügbarkeit nicht annähernd hoch genug, um die spezifizierte Verfügbarkeit zu erreichen oder die Erwartungen zu erfüllen. Sobald der Testträger mehr als 1,5 m parallel versetzt zu den Oberleitungen platziert ist, geht die Erkennung gegen Null. Das hat zwei Gründe, zum Ersten werden nur noch vereinzelt Fahrdrähte erkannt und zum zweiten werden diese dann nur selten getroffen.

Da die Verfügbarkeit schon bei direkter Platzierung unter den Oberleitungen nicht annähernd den Stand erreicht, der angestrebt wurde und bei zunehmendem Versatz die Verfügbarkeit noch zusätzlich abnahm, wurde entschieden, auf weitere Tests zu verzichten.



## Schlussfolgerungen

Bei den durchgeführten Haupttests sollten sämtliche Funktionen des LibroDuct Systems gegenüber dem Pflichtenheft verifiziert werden. Dabei zeigten sich diverse Problemstellungen, die teilweise kurzfristig gelöst werden konnten, aber teilweise auch intensive zukünftige Überarbeitungen nötig machen. So sind Ventile zu tauschen, Konstruktion und Dimensionen sind zu überarbeiten, Kraftangriffspunkte sind neu zu wählen und umzusetzen. Witterungs- und Dauerfestigkeit sind in der heutigen Ausführung ebenfalls noch nicht vollständig gegeben. Der Reifegrad des Konzeptes ist noch nicht ausreichend. Ein Prototypentest auf einem Fahrzeug kann mit dem derzeitigen Stand noch nicht realisiert werden.

Hinzu kommen die Schwächen der Bilderkennung und der Auswertungssoftware. Mit einer Erkennung von ca. 60% der vorhandenen Oberleitungen ist LibroDuct noch hinter den Erwartungen zurück geblieben.

Betrachtet man die Treffergenauigkeit bei ausgewählten Fahrdrähten bei „ungünstigen“ Positionen, die deutlich weniger als 50% beträgt, dann ergibt sich daraus eine Verfügbarkeit von unter 50% in einem Umkreis von 1,5m unter und neben einer Oberleitung. Die spezifizierten Werte wurden dabei nicht erreicht. LibroDuct entspricht demnach nicht dem Stand der bis heute angestrebt war.

Mit dem erfolgreichen Test des Funktionsmusters (FUMU) wurde in 2015 die Machbarkeit bewiesen. Mit dem im 2016 erstellten ProtoProtoen sind nun weitere Erfahrungen gesammelt und Erkenntnisse gewonnen worden. Die technische Realisierbarkeit des Prinzips u.a. mit der stereooptischen Erkennung, ist wiederholt bestätigt worden. Die von den Anwendern geforderte Verfügbarkeit von 99% bei Andrahtungen unter allen Betriebsbedingungen konnte jedoch noch nicht erreicht werden. So bleibt das Fazit der Testtage mit dem Testträger ernüchternd. So konnte LibroDuct weder softwareseitig noch seitens der Mechanik voll überzeugen.

## Entwicklungskosten

Aufgrund der erforderlichen zusätzlichen Entwicklungsschritte bei Software und Mechanik sind weitere Investitionen erforderlich. Der bisherige Business Case kann somit nicht bestätigt werden. Momentan sehen wir ein durchaus chancenreiches Produkt mit gutem Potential jedoch sehr hohem Verkaufspreis. Die Marktchancen werden sich dadurch erheblich reduzieren.

Die für die Testversuche angefallenen Aufwände bzw. die Schlussrechnung sind dem Anhang zu entnehmen.



## Ausblick

Ungeachtet dessen, dass im durchgeführten Test die angestrebte Verfügbarkeit nicht erreicht werden konnte, kann dem System ein ausserordentliches Potential zugesprochen werden. Der Nachweis für die Funktionalität des Systemprinzips wurde nun wiederholt nachgewiesen.

Dennoch hat sich gezeigt, dass die Entwicklung bis hin zur Marktreife des Systems einen beträchtlichen zusätzlichen Aufwand erfordert. Die aufgetretenen Probleme geben einen Ausblick, was noch alles getan werden muss, um das System zu einer Serienreife zu führen. Das fängt an mit der Implementierung des Systems in einen Bus (Standardisierung auch für bereits bestehende Busse möglich?), geht über die Umwelt- und Festigkeitsanforderungen an das System und endet mit der Software selbst, die noch eine grössere Verfügbarkeit durch zuverlässigeres Erkennen der Fahrdrähte gewährleisten muss.

Kummler + Matter wird den Business Case im Anschluss überprüfen und wo nötig anpassen, sowie den Kontakt zu potentiellen Partnern im Trolleybus Umfeld suchen, um eine weitere Finanzierung des Entwicklungsvorhabens zu gewährleisten.