

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Vorstand: Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Rechbauerstraße 12/II, A-8010 Graz



Diplomarbeit

Prüfstandsmessungen von Wiegesensoren

Verfasst von

Pavel Pavlov

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

DI Michael Cik

Graz Oktober 2010

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date (signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern vom Institut für Straßen- und Verkehrswesen bedanken - Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf für die Möglichkeit diese Diplomarbeit zu verfassen und Herrn DI Michael Cik, der mir jederzeit mit professionellem Rat und viel Geduld zur Seite stand.

Mein besonderer Dank gilt Herrn DI Rigobert Opitz von der Firma ROC Systemtechnik und seinem Team, unter deren fachkundiger Anleitung dieses Projekt umgesetzt wurde.

Ferner bedanke ich mich bei meiner Freundin, die mich großartig unterstützt und motiviert hat und meinem Sohn Patrick, der mich in seinen ersten Lebenswochen neben der Fertigstellung dieser Arbeit ganz schön auf Trab hielt. Ein großes Dankeschön ergeht auch an meine Eltern, die mir dieses Studium in Österreich ermöglicht haben.

Graz, Oktober 2010

Pavel Pavlov

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit**von Pavel Pavlov****Institut für Straßen- und Verkehrswesen**
Vorstand Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Rechbauerstraße 12 A-8010 GrazTel.: +43 (0) 316 873-6221
Fax: +43 (0) 316 873-4199
isv@tugraz.at

DVR: 008 1833

UID: ATU 574 77 929

Graz, am 14.11.2009

Prüfstandsmessungen von Wiegesensoren**Problemstellung**

In vielen Ländern sind 30 - 50 % aller Kosten für die Instandhaltung des Straßennetzes auf die Straßenbelastung durch den Schwerlastverkehr zurückzuführen. Entwicklungen der BASt (Bundesanstalt für Straßenbau) Ende der 70er Jahre führten zur Herstellung eines dynamischen Wiege-Sensorsystems, der Biegeplatte basierend auf DMS-Messtechnik auf einer Stahlbiegeplatte angebracht. Weigh in Motion (WIM)- Systeme sind ein effektives Mittel zum Sammeln von Daten für Fahrbahnuntersuchungen, den Straßenbau, die Verkehrsüberwachung und die Durchsetzung der Einhaltung von Gewichtslimiten.

Im Zuge dieser Diplomarbeit werden in Zusammenarbeit mit der Firma ROC Systemtechnik eine spezielle Druckvorrichtung für die exakte Prüfstandsmessung des von ihr entwickelten neuen WIM Matrix - Sensors konstruiert und erste Kalibriermessungen durchgeführt. Langfristig werden bei einer in Graz neu installierten WIM-Testanlage erste Testmessungen und Auswertungen erfolgen. Die daraus analysierten Daten sollen zur Optimierung vollautomatischer dynamischer Achslastwiegesysteme führen.

Aufgabenstellung

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Diplomarbeit; Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich:

- Literaturrecherche
- Prüfstandaufbau und Inbetriebnahme
- Testmessungen im Labor mit Sartorius Waage
- Auswertung und Analysen der Testmessungen

Die Betreuung der Arbeit erfolgt in Abstimmung mit dem Ingenieurbüro ROC-Systemtechnik.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Diplomarbeitstext, Präsentationen sowie allen Analysedaten ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. 0316 873 6220,
martin.fellendorf@tugraz.at
BetreuerDI Michael Cik
Tel. 0316 873 6224
michael.cik@tugraz.at
Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Die Zerstörung der Straßen durch überladene LKW und die aufwendige Instandhaltung verursachen Unfälle und enorme unnötige Kosten. Weigh-in-Motion (WIM) ist eine Messmethode, mit deren Hilfe unter anderem die auftretenden Achslasten und Gesamtgewichte der die Messeinrichtungen passierenden Fahrzeuge während der Fahrt erfasst werden können. Die derzeit lieferbaren und eingesetzten WIM-Systeme zur dynamischen Erfassung von Fahrzeuggewichten auf Straßen erfüllen die künftigen Anforderungen nach Vollautomatisierung der Gewichtskontrollen und entsprechende Ahndung nicht. Gemäß Erfahrungen aus dem internationalen TOP TRIAL Projekt 2001 sind Messdatenqualität, Lebensdauer der Sensoren und Sicherheit des Einbaus in der Straße zu verbessern. Vor allem zeigte sich auch, dass die Genauigkeit der WIM-Sensoren und ihre Kalibrierbeständigkeit verbessert werden mussten.

Diese Ansprüche waren für die Firma ROC Systemtechnik (Graz) seit dem Jahre 2000 Anlass für die Entwicklung einer neuen WIM-Technologie – dem sogenannten Matrix-Sensor. Die Firma ROC ist dabei Partner und Hauptkoordinator in technischen Angelegenheiten des EU-Projektes ASSET Road (Advanced Safety and Driver Support in Efficient Road Transport). Dieser WIM-Sensor besteht aus Modulen mit Dehnungsmessstreifen in Mini-Scherkraftaufnehmern und wird statisch und voraussichtlich auch dynamisch eichfähig sein. Aufgrund des speziellen Aufbaus des Sensors mit 16 Messpunkten ist es notwendig, eine Prüfvorrichtung zu konzipieren, die die Druckkraft auf alle Messpunkte gleichmäßig verteilt. Damit sollte der Matrix-Sensor exakter kalibriert und in weiterer Folge eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden können.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird in Zusammenarbeit mit der Firma ROC Systemtechnik eine spezielle Druckvorrichtung für die exakten Prüfstandsmessungen des von ihr entwickelten neuen WIM Matrix Sensor konstruiert und erste Kalibriermessungen durchgeführt.

Nach einem Überblick über den Stand der Technik statischer und dynamischer Wiegesysteme wird zunächst der innovative WIM Matrix-Sensor mit seinen Merkmalen und Vorteilen vorgestellt. Das folgende Kapitel beschreibt als Schwerpunkt der Diplomarbeit die Entwicklung und Realisierung des Prüfsystems in Form einer elektrohydraulischen Presse mit Neukonstruktion eines Kraftverteilers zur exakten Kalibrierung des neuen WIM-Sensors. Der gesamte Entwicklungsprozess beginnend mit der Analyse der Anforderungen, der Konstruktion und Inbetriebnahme des Systems wird beschrieben. Auftretende Probleme und deren Lösung werden erläutert. Sämtliche Komponenten der Prüfvorrichtung, die in Mechanik, Hydraulik, Elektrik und Messtechnik unterteilt werden, werden in Aufbau und Funktion ausführlich dargestellt. Abschließend werden die Funktion der Anlage, die Abläufe der Kalibriermessungen und das Zukunftsszenario einer WIM-Wiegestation erläutert sowie anhand von Beispielen veranschaulicht.

Abstract

The destruction of roads by overloaded trucks and time consuming maintenance cause accidents and enormous unnecessary costs. Weigh in motion (WIM) is a measuring method of determining the gross weight and axle loads of vehicles as they pass measurement instruments. Currently available and applied WIM systems for the dynamic collection of vehicle weights on roads do not fulfill the future requirements for fully automatization of weight controls and appropriate enforcement. In accordance with experiences from the international TOP TRIAL project 2001 measuring data quality, life span of the WIM-sensors and security of their installation in the road need to be improved. Above all it was shown that the accuracy of the WIM sensors and their calibration stability had to be improved.

For ROC system engineering (Graz) since the year 2000 these requirements posed the cause for the development of a new WIM technology- the so-called matrix sensor. The company ROC system engineering is thereby partner and main coordinator in technical affairs of the European Union project ASSET Road (Advanced Safety and Driver support in Efficient Road transport). This innovative WIM sensor consists of modules with strain gauges in mini shearing stress receivers and will be statically and presumably also dynamically calibratable. Due to the special WIM sensor structure with 16 measuring points it is necessary to construct a testing machine for calibration in order to distribute the pressure on all measuring points evenly. Thus the calibration of the sensor should be more accurate and in further consequence achieve a higher measuring accuracy.

In this diploma thesis in cooperation with ROC system engineering a special testing machine for the accurate calibration measurements of the new WIM matrix sensor will be developed and first calibration measurements will be accomplished.

After an overview of the state of the art regarding static and dynamic weighing systems firstly the innovative WIM matrix sensor with its characteristics and advantages is introduced. As emphasis of the diploma thesis the following chapter describes the development and realization of the testing machine in form of an electrohydraulic press with the construction of a pressure distributor for the accurate calibration of the new WIM sensor. The entire development process starting with the analysis of the requirements, the construction and start-up of the system are described. Arising problems and their solution are discussed. All components of the testing machine which are divided into mechanics, hydraulics, electrical connections and measuring technique, are represented in detail. Finally the function of the machine, the operating sequence of the calibration measurements and the future scenario of a WIM weighing station are described and illustrated on the basis of examples.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Problemstellung	11
1.2	Ziel der vorliegenden Arbeit.....	14
1.3	Struktur der Diplomarbeit	14
2	Stand der Technik	16
2.1	Statische Wiegesysteme	16
2.1.1	Plattformwaagen.....	16
2.1.2	Portable Radlastwaagen.....	16
2.2	Dynamische Wiegesysteme	17
2.2.1	Plattensensoren.....	18
2.2.2	Streifensensoren	21
2.3	Zusammenfassung bisheriger Wiegetechnologien	24
2.4	WIM Standardisierung.....	25
3	ROC WIM-Sensor	28
3.1	Sensor Übersicht.....	28
3.2	Aufbau des Matrix - Sensors	33
3.2.1	Dehnungsmessstreifen	34
3.3	Innovationen und Merkmale des Sensors.....	36
4	Entwicklung des Prüfsystems für den ROC WIM-Sensor	37
4.1	Problemstellung	37
4.2	Entwicklungsprozess.....	37
4.3	Gesamtaufbau des Prüfsystems	38
4.4	Mechanik.....	42
4.4.1	Rahmenkonstruktion.....	42
4.4.2	Kraftverteiler	44
4.4.3	Funktion von Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler.....	52
4.5	Hydraulik.....	55
4.5.1	Funktionsplan	55
4.5.2	Kompaktaggregat und Hydraulikhandpumpe	57
4.5.3	Hydraulikzylinder und Ventile.....	58
4.6	Elektrik	66
4.6.1	Elektromotor	66
4.6.2	Steuerkasten	66
4.6.3	Stromversorgung	68
4.7	Messtechnik	68
4.7.1	Messwertverarbeitung	68
4.7.2	Präzisions-Drucklast-Wägezelle	69

4.7.3	Waagenindikator.....	72
4.8	Probleme und Lösungen bei der Entwicklung und Inbetriebnahme des Prüfsystems	74
5	Steuerung des Prüfstandes und Testmessungen	75
5.1	Steuerung des Prüfstandes.....	75
5.2	Testmessungen.....	77
5.2.1	Kalibriermessungen des WIM Sensors am Prüfstand	77
5.2.2	Testmessungen in der Strasse	83
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	88
6.1	Zusammenfassung.....	88
6.2	Ausblick.....	90
7	Anhang A.....	91
8	Literaturverzeichnis.....	93

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tab.1: Wiegetechnologien Anwendungen.....	25
Tab.2: OIML R 134-1: 2003 Genauigkeitsklassen.....	26
Tab.3: Hydraulikzylinder Presse Abmessungen.....	59
Tab.4: Hydraulikzylinder Kraftverteiler Abmessungen.....	61
Tab.5: Sensorwerte und Sartorius Werte.....	78
Tab.6: Umrechnung Sensor-Messwerte in Kilowerte.....	80
Abb. 1: Negative Effekte überladener LKW.....	12
Abb. 2: Struktur der Diplomarbeit.....	15
Abb. 3: Tamtron Scalex Fahrzeugwaagen.....	16
Abb. 4: Portable Radlastwaage.....	17
Abb. 5: Vergleich Messprinzip.....	17
Abb. 6: 230 mm Wiegeplatte der Fa. Chongqing Jiaoke Yuanxing Technology Ltd.....	18
Abb. 7: Verkehrssensor Biegeplatte Fa.PAT Ettlingen.....	19
Abb. 8: Einbauschema der kapazitiven Wiegeplatte von Haenni/ Mikros in der Oberbau.....	20
Abb. 9: Einbauschema des ECM Sensors.....	21
Abb. 10: Einbau des glasfaserverstärkten Balkens von Lacroix im Oberbau.....	22
Abb. 11: Einbauschema des MSI Sensors.....	22
Abb. 12: Kistler Quarzsensoren.....	23
Abb. 13: Struktur Glasfaser Verkehrssensor der Fa. Sensorline.....	24
Abb. 14: ROC Matrix-Sensor.....	28
Abb. 15: Matrix Sensorstruktur (Bodenplatte, SKA mit neuer Elektronik für 16 DMS Messkanäle und CAN BUS Anschluss links und rechts).....	29
Abb. 16: Sensorwanne mit 5 Matrix Sensor Modulen.....	29
Abb. 17: Zwei Sensorwannen (links) mit Abdeckrahmen (rechts).....	30
Abb. 18: Sensorwanne und Abdeckrahmen Abmessungen.....	30
Abb. 19: Gesamtaufbau Sensormodule, Sensorwanne und Straßeneinbaurahmen.....	31
Abb. 20: Straßeneinbaurahmen.....	32
Abb. 21: ROC WIM in der Fahrbahn.....	32
Abb. 22: Sensormodul mit Grund und Abdeckplatte.....	33
Abb. 23: ROC Matrix Sensor Prinzip.....	33
Abb. 24: Scherkraftaufnehmer.....	34
Abb. 25: Scherkraftaufnehmer Sandwich Scherkraftsensor (2 Messpunkte) mit DMS Technologie auf einen Stahlfederband.....	34
Abb. 26: Dehnungsmessstreifen.....	35
Abb. 27: Entwicklungsschritte.....	37
Abb. 28: Prüfsystem ROC Systemtechnik.....	38
Abb. 29: Gesamtaufbau Prüfvorrichtung,3D Isometrie (Pavlov 2010).....	39
Abb. 30: Prüfsystem Gesamtaufbau.....	39
Abb. 31: ROC Systemtechnik Prüfvorrichtung Details (Pavlov 2010).....	41
Abb. 32: Rahmenkonstruktion in 3 D (Pavlov 2010).....	42
Abb. 33: Abmessungen Rahmenkonstruktion (Pavlov 2010).....	43
Abb. 34: ROC Systemtechnik Kraftverteiler.....	44
Abb. 35: ROC Systemtechnik Kraftverteiler 3D Ansicht Isometrie (Pavlov 2010).....	45
Abb. 36: Kraftverteiler Explosionsansicht (Pavlov 2010).....	46
Abb. 37: Kraftverteiler Explosionsansicht (Pavlov 2010).....	47

Abb. 38: Kraftverteiler Explosionsansicht Untersicht (Pavlov 2010)	47
Abb. 39: Kraftverteiler Abmessungen (Pavlov 2010).....	48
Abb. 40: Platte 1 – Basisplatte (Pavlov 2010)	49
Abb. 41: Platte 2 – Mittelplatte (Pavlov 2010)	50
Abb. 42: Platte 3 – Oberplatte (2010).....	51
Abb. 43: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler (Pavlov 2010)	52
Abb. 44: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler Details (Pavlov 2010)	53
Abb. 45: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler Abmessungen (Pavlov 2010).....	54
Abb. 46: Funktionsschaltplan	56
Abb. 47: Kompaktaggregat BC – 20.....	57
Abb. 48: Yale Handpumpe	58
Abb. 49: Hydraulikzylinder Lukas	58
Abb. 50: Hydraulikzylinder Abmessungen.....	59
Abb. 51: Hydraulikzylinder Lukas Details	60
Abb. 52: Hydraulikzylinder Fa. Hydro-Cardan	61
Abb. 53: Hydraulikzylinder Abmessungen.....	61
Abb. 54: 2-Wege-Magnetventil.....	62
Abb. 55: Druckbegrenzungsventil mit Manometer.....	62
Abb. 56: Nadeldrosselventil NDV 06-R 1/8“	63
Abb. 57: Nadeldrosselventil Abmessungen.....	63
Abb. 58: Rückschlagventil RV 08 L	64
Abb. 59: Kugelhahn	64
Abb. 60: Dreiwegehahn	65
Abb. 61: Hydraulikschlauch.....	65
Abb. 62: Steuerkasten	66
Abb. 63: Steuerung Hydraulik, Hydraulikmotor, druckloser Umlauf	67
Abb. 64: Steuerung Hydraulik, Ansteuerung Ventile	67
Abb. 65: Messwertverarbeitung	68
Abb. 66: Sartorius Präzisions-Drucklast-Wägezelle PR 6201.....	69
Abb. 67: Abmessungen Sartorius Wägezelle	70
Abb. 68: Combics CISL1-Waagenindikator	72
Abb. 69: Steuerkasten	75
Abb. 70: Steuersystem.....	76
Abb. 71: Sensor-Messwerte vor Kalibrierung	77
Abb. 72: Sensorwerte im Vergleich mit Sartorius Werten.....	79
Abb. 73: Lineare Regression.....	79
Abb. 74: Summe der 16 Messwerte	81
Abb. 75: Sensor-Messwerte nach der Kalibrierung bei 100 kg/Messpunkt.....	81
Abb. 76: Sensor-Messwerte nach der Kalibrierung bei 200 kg/Messpunkt.....	82
Abb. 77: Druckabhängiger Kurvenverlauf der Sensor-Messwerte	82
Abb. 78: WIM Wiegestation.....	83
Abb. 79: Sensorwanne mit Abdeckrahmen	84
Abb. 80: Zwei WIM Sensorreihen in der Straße	84
Abb. 81: Infrarotkamera	85
Abb. 82: Datenerfassung im Kontroll-Container	85
Abb. 83: WIM Footprint Zwillingstreifen, Bsp. 1	86
Abb. 84: WIM Footprint Zwillingstreifen, Bsp. 2.....	86
Abb. 85: Vollautomatische Überladungskontrolle	87

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte ist die Anzahl der Schwerlastfahrzeuge im Bundesfernstraßennetz signifikant angestiegen. Im Vergleich zu Ergebnissen der 1980er Jahre hat sich die Fahrzeuganzahl etwa auf den doppelten Wert erhöht [BUSCHMEYER et al. 2007]. Hinsichtlich der Anzahl an Zulassungsanträgen für genehmigungspflichtige Schwertransporte sind zugleich überproportionale Zuwächse zu verzeichnen [NAUMANN et al. 2005; SAMOL et al. 2006]. Zusätzlich zum generell gestiegenen Verkehrsaufkommen werden Überladungen von Schwerfahrzeugen häufig beobachtet [VAN LOO et al. 2005]. Unlängst standen die Einführung von neuen Fahrzeugkonzepten und die Anhebung der zulässigen Gesamtgewichte auf 50 t und mehr in der öffentlichen Diskussion [GLAESER et al. 2006; NAUMANN 2006; GRÜNBERG et al. 2007].

Prognosen über die Verkehrsentwicklung bis zum Jahr 2015 gehen von einem Anstieg des Schwerlastverkehrs von bis zu 60% gegenüber dem Jahr 2000 aus [NAUMANN 2007; VDA 2006]. Da ein weiterer Ausbau des Straßennetzes nur noch eingeschränkt möglich ist, wird der zu erwartende Schwerlastverkehr vornehmlich durch eine intensivere Nutzung der bestehenden Infrastrukturobjekte bewältigt werden [NAUMANN 2002].

In vielen Ländern sind 30- 0% aller Kosten für die Instandhaltung des Straßennetzes auf die Zerstörungseffekte durch den Schwerlastverkehr zurückzuführen [OPITZ 2007]. Wegen des zunehmenden Konkurrenzkampfes zwischen Straße und Schiene, vor allem im Güterverkehr, wird die Höchstlast eines Transportes immer weiter angehoben. Es liegt auf der Hand, dass dadurch Straßen und Brücken heutzutage viel intensiver belastet werden als noch vor einigen Jahren und somit die Instandsetzungskosten rapide in die Höhe gegangen sind. [HABERL 2002]. Die durchschnittlichen Baukosten für einen österreichischen Autobahnkilometer im Jahr 2000 lagen bei ca. 10,5 Mio Euro [HERRY et al. 2003]. Die dynamische Straßenbelastung wird maßgeblich bestimmt von der Verteilung der Achsen [siehe Anhang A Auswirkungen von Achslast und Achslastverteilung], dem Federungs- und Dämpfungssystem des Fahrzeuges, der Art der Reifen und Räder, der landesweiten Zusammensetzung der Fahrzeugflotten, den Unebenheiten der Straße, der Fahrzeuggeschwindigkeit und vor allem den in bis zu 10-20% auftretenden Überladungen [OPITZ 2007].

Um dem entgegenwirken zu können, ist es notwendig, genaue Aufzeichnungen über das tatsächliche Verkehrsaufkommen und die tatsächlichen Fahrzeug- und Radlasten unter regulären Verkehrsbedingungen zu haben.

Weigh-in-Motion (WIM) - Systeme (dynamische Achslastwiegesysteme) wurden Ende der 70er mit dem Ziel entwickelt das gesamte Verkehrsaufkommen ohne Störung des Verkehrsflusses zu erfassen [WAVE 2001]. Die Messung wird dabei mit Hilfe von Systemen

in oder auf dem Fahrbahnbelag vorgenommen. Weigh-in-Motion–Systeme sind ein effektives Mittel zum Sammeln von Daten für Fahrbahnuntersuchungen, den Straßenbau, die Verkehrsüberwachung und die Durchsetzung der Einhaltung von Gewichtslimiten. Mit WIM-Systemen ist es möglich, die auftretenden Achslasten und Gesamtgewichte der die Messeinrichtungen passierenden Fahrzeuge während der Fahrt zu messen und anschließend auszuwerten. Durch kontinuierlich ablaufende Messungen können die zuständigen Behörden das tatsächliche Verkehrsaufkommen verfolgen und haben somit die Möglichkeit, auf Änderungen der Verhältnisse sofort zu reagieren [HABERL 2002].

Zusammenfassend sind die Hauptursachen für den Bedarf an effektiver WIM Technologie:

- steigender Schwerlastverkehr auf den Hauptverkehrsadern
- 10-20% überladene Schwerlasttransporte (Achsen- und Gesamtgewichte)
- Notwendigkeit der Reduktion des erhöhten Sicherheitsrisikos durch überladene Straßenfahrzeuge
- Vermeidung der Zerstörung der Infrastruktur Straße
- Verringerung der Straßen- und Brückenerhaltungskosten verbunden mit Verlängerung der Lebensdauer
- verbesserte Daten für Straßenabnutzungsmodelle

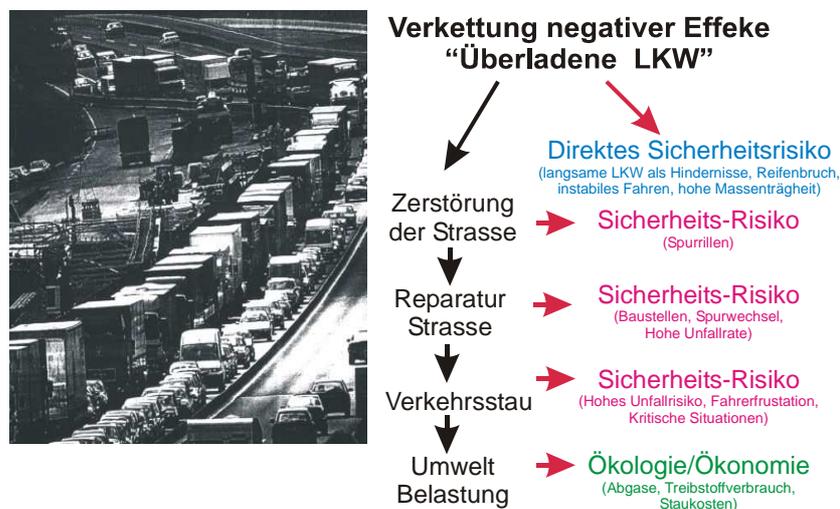


Abb. 1: Negative Effekte überladener LKW

WIM Technologie ist heute weltweit im Einsatz und umfasst bisher folgende Anwendungen, maßgeblich unter dem Aspekt der Erhöhung der Verkehrssicherheit:

- Verkehrs- und Achslaststatistiken zur Abschätzung der Straßenbelastung
- Vorselektion überladener Straßenfahrzeuge in Wiegestationen
- dynamische Achslast- und Gewichtskontrolle mit Möglichkeit der Ahndung von Gewichtüberschreitungen (low speed WIM bis 5 km/h)
- Objektschutz (Brücken und Maut)

- Mautstationen mit Gewichtsberücksichtigung

Künftig sollen vermehrt moderne Technologien aus der Digital- und Kommunikationstechnik als Basis leistungsgesteigerter und eichfähiger WIM Sensorik eingesetzt werden. Als Beispiele der Verwendung von Digitaltechnik und Automatisierung sind Kontrollnetzwerke in Frankreich auf dem Gebiet der automatisierten Geschwindigkeitskontrolle zu nennen (mit ca. 1000 Stationen und einer Zentrale in Lyon), die erfolgreich die Unfallzahlen reduzierten und wirtschaftlich betrieben werden. Für die vollautomatische Überladungskontrolle von Straßenfahrzeugen (high speed WIM) ist zukünftig ein entsprechender Aufbau von Netzwerken zu erwarten, weil die Ahndung von Gewichtsüberschreitungen und auch die Mauterhebung zu erheblichen Geldflüssen führen wird und der Problemdruck des ständig wachsenden und unzureichend kontrollierten Schwerlastverkehrs immer größer wird. Vollautomatische Überladungskontrolle von Straßenfahrzeugen während der Fahrt (high speed WIM) kann als neues Produkt und als Basis für flächendeckende Kontrollnetzwerke betrachtet werden, um höhere Kontrolleffizienz, sehr positive Wirtschaftlichkeit und eine drastische Reduktion der jetzigen Personalkosten zu erreichen [OPITZ 2007].

Zusammenfassend ergeben sich folgende künftige Anwendungen der WIM-Technologie:

- vollautomatische Erkennungs- und Bestrafungssysteme von Überladungen von Straßenfahrzeugen und ihrer Achsen zur Anwendung im fließenden Verkehr, zum Schutz der Infrastruktur (Brücken, Tunnel, Straßendecken) und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Datenübermittlung in eine Zentrale
- hochgenaue Vorselektion von überladenen Fahrzeugen für jetzige halbautomatische Überladungskontrolle in Wiegestationen
- WIM verkoppelt mit Mautsystemen (zukünftige Gewichtsberücksichtigung der Achsen und Fahrzeuggewichte, Fahrzeugklassifizierung)
- Möglichkeit der Gewinnung von neuen Messdaten für Forschungsprojekte zur Analyse der Straßenabnutzung
- Analyse der Messdaten bezüglich der Bildung von Spurrillen und der Belastungsverteilung auf Straßen.
- modularer Aufbau einer ganzen Produktfamilie von Wägetechnik bestehend aus Hochgeschwindigkeits-WIM mit Schwellen und Platten, Array Systemen für automatische Ahndung, eichfähige Langsamwaagen als Achslastwaagen und tragbare Radlastmesser

Einsparungen und Verbesserungen durch eine konsequente Anwendung und Weiterentwicklung der WIM-Technologie ergeben sich durch:

- Einnahmen von Ahndungsgebühren
- Reduktion der Wartung und Reparatur von Straßen und Infrastruktur
- Erhöhung der Verkehrssicherheit mit Unfallreduktion
- Verringerung der Unfallkosten
- Verringerung der Umweltbelastung durch z.B. weniger Staus
- Verbesserung des Verkehrsflusses
- fairer Wettbewerb der Spediteure

1.2 Ziel der vorliegenden Arbeit

Projekte mit dynamischen Wiegesystemen zeigten, dass die derzeit lieferbaren und eingesetzten Systeme zur Erfassung von Fahrzeuggewichten auf Straßen die an sie gestellten zukünftigen Anforderungen nach Vollautomatisierung der Gewichtskontrollen nicht erfüllen. Gemäß Erfahrungen aus dem internationalen TOP TRIAL Projekt 2001 sind Messdatenqualität, Lebensdauer der Sensoren und Sicherheit des Einbaus in der Straße für vollautomatische Ahndung noch zu verbessern [1]. Vor allem zeigte sich, dass die Genauigkeit der WIM-Sensoren und ihre Kalibrierbeständigkeit verbessert werden mussten. Diese Ansprüche waren seit dem Jahre 2000 Anlass für die Entwicklung einer neuen WIM-Technologie – dem sogenannten Matrix-Sensor. Der WIM-Sensor wird statisch und voraussichtlich auch dynamisch eichfähig sein. Aufbauend auf Modulen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) in Mini-Scherkraftaufnehmern und einer im Sensor integrierten Elektronik zur digitalen Signalverarbeitung wird eine ganze Produktfamilie entstehen [OPITZ 2007].

Im Zuge dieser Diplomarbeit werden in Zusammenarbeit mit der Firma ROC Systemtechnik eine spezielle Druckvorrichtung für die exakten Prüfstandsmessungen des von ihr entwickelten neuen WIM Matrix-Sensor konstruiert und erste Kalibriermessungen durchgeführt. Langfristig werden bei einer in Graz neu installierten WIM-Testanlage erste Testmessungen und Auswertungen erfolgen. Die daraus analysierten Daten sollen zur Optimierung vollautomatischer dynamischer Achslastwiegesysteme führen.

Die Firma ROC ist dabei Partner und Hauptkoordinator in technischen Angelegenheiten des EU-Projektes ASSET Road (Advanced Safety and Driver Support in Efficient Road Transport) [2].

1.3 Struktur der Diplomarbeit

Die Diplomarbeit gliedert sich – wie auch in Abbildung 2 ersichtlich – in folgende Schritte: Der Einleitung im Kapitel 1 mit der Problemstellung und Zielsetzung folgt im Kapitel 2 die Analyse des Standes der Technik statischer und dynamischer Wiegesysteme. Im Kapitel 3 wird der innovative WIM Matrix-Sensor, wie er von der Firma ROC Systemtechnik entwickelt wurde, mit seinen Merkmalen und Vorteilen vorgestellt. Das Kapitel 4 als Schwerpunkt der Arbeit beschreibt die Entwicklung und Realisierung des Prüfsystems in Form einer elektrohydraulischen Presse mit Neukonstruktion eines Kraftverteilers zur exakten Kalibrierung des neuen WIM-Sensors. Im Kapitel 5 werden die Messabläufe erläutert und anhand von Beispielen veranschaulicht. Kapitel 6 bietet eine Zusammenfassung der Arbeit und Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen.

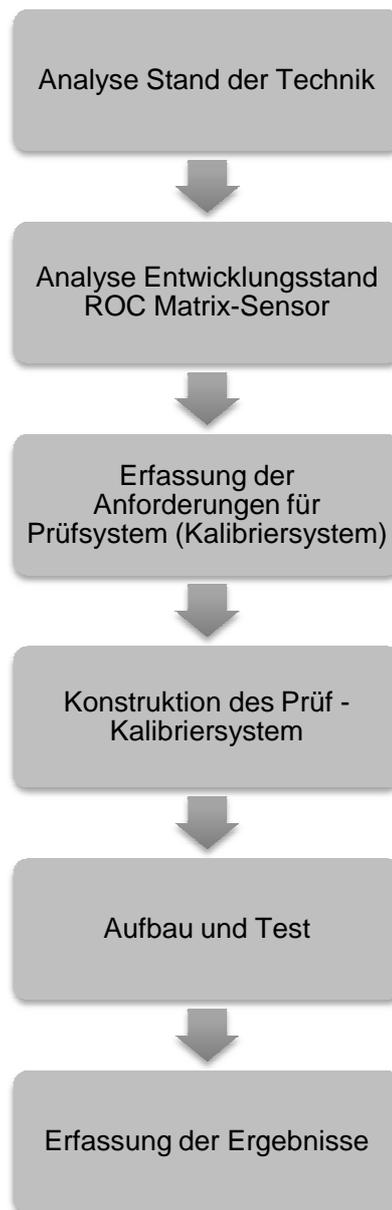


Abb. 2: Struktur der Diplomarbeit

2 Stand der Technik

Grundsätzlich ist beim Wiegen von Fahrzeugen zwischen statischen und dynamischen Wiegesystemen zu unterscheiden. Statische Wiegesysteme wie Plattformwaagen und Radlastwaagen stellen das Gewicht stillstehender Fahrzeuge fest. In dynamischen Wiegesystemen erfolgt die Gewichtsmessung während der Fahrt.

2.1 Statische Wiegesysteme

2.1.1 Plattformwaagen

Gewichtsmessung mit Plattformwagen ist die älteste Art Kontrollen der Fahrzeuggewichte durchzuführen. An verschiedenen Standorten fest eingebaute Plattformwaagen (Größe 12 m x 3 m) mit 4 oder 6 Kraftmessdosen im Fundament und einem Wiegehaus dienen zum Verwiegen von Fahrzeuggewichten im Stand. Achsgewichte sind nur mit erheblichem Aufwand und entsprechender Auf- und Abfahrprozedur messbar. Plattformwaagen benötigen ein großes Betonfundament. Bevor gemessen werden kann, muss das Fahrzeug und die Waage nach der Auffahrt ausschwingen. Kontrollen von Überladungen haben sich als aufwendig erwiesen, weil das zu prüfende Fahrzeug erst zur Plattformwaage geleitet werden muss [OPITZ 2007].



Abb. 3: Tamtron Scalex Fahrzeugwaagen

2.1.2 Portable Radlastwaagen

Für den mobilen Einsatz, unter anderem auf Parkplätzen, wurden tragbare Radlastmesser entwickelt. Diese relativ schweren Radlastmesser (23 kg) müssen jeweils vor jeder Mes-

sung paarweise (2,4 oder 6) vor die LKW Räder gelegt werden Der LKW muss anschließend genau Achse für Achse auf die Radlastwaagen fahren. Für Mehrfachachsen müssen entweder Dummy-Platten oder 4 bzw. 6 Radlastwagen verbunden werden, um einen ebenen Aufstand der Räder zu gewährleisten. Eine straßenseitige Auswerteeinrichtung mit PC protokolliert und addiert die gemessenen Radgewichte und ermittelt die Überladungen bei Eingabe des Fahrzeugtyps. Der Prüfplatz muss eben sein. Derartige Messungen haben sich durch den hohen manuellen Aufwand nicht als sehr praktisch erwiesen und werden nur sporadisch durchgeführt. Hinzu kommt das Problem der geringen Erfolgsrate, wirklich überladene LKW zu erfassen, weil die Selektion der LKW nach dem Zufallsprinzip erfolgt [OPITZ 2007].



Abb. 4: Portable Radlastwaage

2.2 Dynamische Wiegesysteme

Beim dynamischen Wiegen von Straßenfahrzeugen sind momentan verschiedene Technologien bzw. Sensoren im Einsatz, wobei man zwischen Plattensensoren und Streifensensoren unterscheidet. Die physikalischen Messprinzipien sind grundsätzlich verschieden, was auch in der nachfolgenden Abbildung 5 deutlich wird:

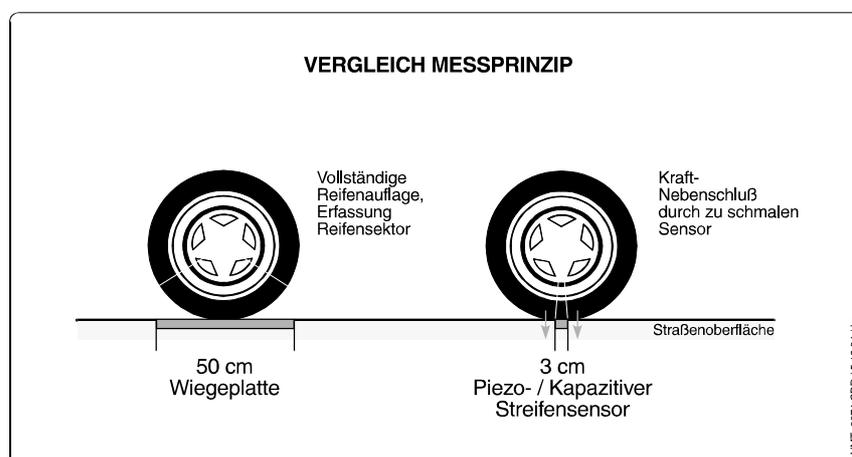


Abb. 5: Vergleich Messprinzip

Grundsätzlich sind vier physikalische Messtechnologien für dynamische Wiegesensoren in Anwendung:

- Dehnungsmessstreifen (DMS) mit Metallelementen (Biegeplatte, Scherkraftaufnehmer mit aufliegenden Beton- bzw. Metallplatten, Kraftmessdosen mit Membrane). Diese Sensoren messen die Kraft direkt proportional zum Gewicht.
- Piezosensoren (Piezokabel, PVDF Film, Quarz) erzeugen Signale proportional zur Gewichtsänderung, die integriert werden müssen, um das Gewicht zu erhalten.
- Kapazitive Sensoren (2 Metallplatten mit einer elastischen Zwischenlage) verändern ihre Kapazität beim Aufeinanderpressen.
- Loadcells (Wägezelle) mit Wiegebrücken oder Plattformen.

2.2.1 Plattensensoren

Wiegeplatte

Der von der Firma IRD hergestellte HS-WIM Wiegeplattensensor (HS = High Speed) besteht aus einer festen Metallplatte (ca. 1,75 m x 0,5 m), die auf 6 Scherkraftaufnehmern aufliegt und in einem in der Straße installierten Rahmen eingebaut wird. Dieser WIM Sensor ist neben der PAT Biegeplatte zum gebräuchlichsten WIM Sensor in den USA geworden. Die Genauigkeit ist entsprechend gleich gut, die Auflage der 6 Scherkraftaufnehmer ist in Intervallen nachjustieren. Der Wiegeplattensensor wird für Statistikanlagen und Selektionswaagen eingesetzt. Es gibt auch etliche Anwendungen in Mautsystemen.

In China begannen vor ca. 10 Jahren erste Versuche mit dynamischen Wiegesensoren. Eine schmalere Ausführung einer Wiegeplatte wird in China von der Fa. Chongqing Jiaoke Yuanxing Technology Ltd und Zhongshan Road Automatic Equipment Ltd hergestellt und vertrieben. Das „WIM System SM 2000s“ kann 14 LKW Typen unterscheiden. Lebensdauer ca. 8 Jahre.



Abb. 6: 230 mm Wiegeplatte der Fa. Chongqing Jiaoke Yuanxing Technology Ltd

Biegeplatte

Die Entwicklung dieser Sensorik zur Achslasterfassung von LKW wurde in den 70er Jahren erstmalig in Deutschland durch die BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) durchgeführt. Sie wird in nationalen Verkehrsstatistik - Systemen zur Erhebung der Achslasten und zur Vorselektion überladener LKW als auch in Mautsystemen eingesetzt [OPITZ 2007].

Prinzip: Messung der Radlast bei Überfahrt anhand der Durchbiegung einer Metallplatte (mit einer aufgebrachten DMS Kette). In den 70er Jahren wurden auf diese Weise über 100 Messstationen in der BRD mit WIM für 10 Jahre betrieben. Pro Jahr wurden anschließend 500 bis 1000 Sensoren produziert und weltweit vertrieben.

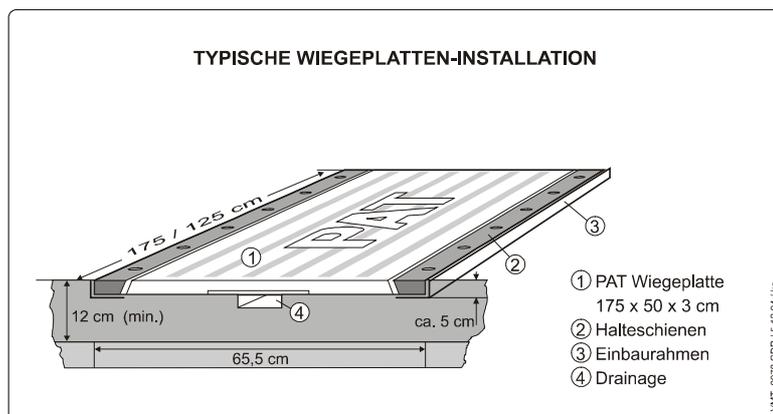


Abb. 7: Verkehrssensor Biegeplatte Fa.PAT Ettlingen

Biegeplattensysteme benutzen Metallrahmen mit darin eingebetteten Wiegesensoren (Biegeplatten), die zur Unterseite hin aufgelagert sind. Die Kraft, mit der ein Fahrzeug (radweise - von den rollenden Reifen ausgeübt) über einen Sensor fährt, wird aufgezeichnet. Generell werden die Sensoren zur Vorselektion von Fahrzeugen, für die Datenerfassung von Gewichtskollektiven von Fahrzeugen und Achsen und für industrielles und militärisches Wiegen verwendet. Die Biegeplattensysteme können ein oder zwei getrennte Sensoren oder auch mehrere Sensorschwellen enthalten. Sie werden permanent senkrecht zur Fahrrichtung in die Straßendecke installiert (in die Straßenstruktur). Mit Hilfe von zwei Biegeplatten pro Spur können die Räder individuell gewogen werden.

Wiegeplattform

Der WIM Sensor bis 60 km/h für Selektionswaagen der Firma Toledo besteht aus 2 Metallplattformwaagen (ca. 2 x 1,25 m x 0,5 m), die auf einer Kraftmessdose (Loadcells) oder Scherkraftaufnehmern mit DMS aufliegen und in einen in der Straße installierten Betonsockel eingelagert werden. Der Aufbau erfordert große Eingriffe in die Straßenstruktur und ist aufwendig. Durch den massiven Aufbau ist die Messgenauigkeit der WIM Selektionswaage hoch. Die Wiegeplatten werden hauptsächlich in Selektionswaagen in USA eingesetzt.

Kapazitive Wiegeplatte

Kapazitive Systeme bestehen aus zwei oder mehr Metallplatten (Konduktoren) mit einer dazwischen gelagerten Isolationsschicht. Für WIM Anwendungen sind mehrfache Kondensatoren und nicht leitende Abstandshalter üblicherweise in Matten eingebettet, hergestellt aus rostfreiem Stahl, Messing, Polyurethan und hartem Gummi. Bei Belastung ändert sich die Entfernung zwischen den Platten, eine Kapazitätsänderung (im Gegensatz zu der Spannungsänderung bei piezoelektrischen Systemen) verursachend. Von dieser elektrischen Schwankung wird das Gewicht berechnet. Solche kapazitiven Wiegeplatten werden von Mikros Systems (Pretoria, Südafrika) hergestellt und von Haenni & Co Ltd, Schweiz, angeboten. Diese kapazitive Wiegeplatte besteht aus einer 1,2 cm tiefen, 200 cm langen und 50 cm breiten Plattform. Sie ist mit Hilfe von 2 Balken an einem im Oberbau eingelassenen Metallrahmen fixiert. Dieser Metallrahmen wird vor dem Einbau der Wiegeplatte in einer 200 x 50 x 4 cm großen Grube im Oberbau auf einem Harzbett montiert.

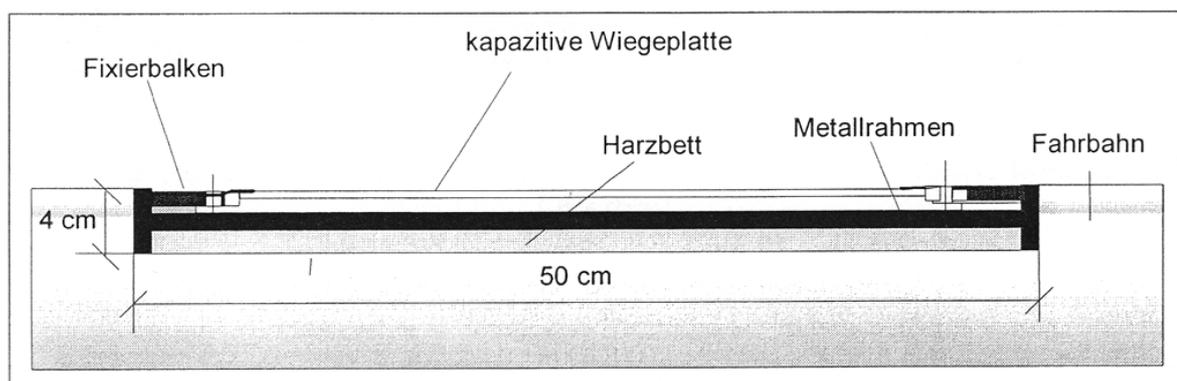


Abb. 8: Einbauschema der kapazitiven Wiegeplatte von Haenni/ Mikros in der Oberbau

Brückensensoren

Brücken-WIM ist eine Sonderform, die existierende Brücken als Wiegeplattform nutzt. Viele BWIM - Systeme benötigen Informationen von Spannungs-Sensoren, die an der Untersicht der Brücke installiert werden und Achsdetektoren, die in den Belag eingebaut werden müssen. Neueste Systeme beziehen alle Informationen von den Sensoren an der Untersicht. Jedes Fahrzeug, das das System passiert, wird aufgezeichnet. Gemessen werden unter anderem Datum und Uhrzeit des passierenden Fahrzeuges, Achslast, Achsabstände, Abstand von der ersten zur letzten Achse, Gesamtgewicht und ESAL-Werte (equivalent single axle load). Mit diesen Informationen können zuverlässige Aussagen über die Restlebensdauer der Brücke gemacht werden [3].

2.2.2 Streifensensoren

Piezosensoren

Piezoelektrische Sensoren transformieren Druckänderungen (von einer Achse oder einem Rad ausgeübt) in Spannung. Aus der elektrischen Ladungsverschiebung berechnet das System die dynamische Last und leitet einen statischen Lastwert mit Hilfe von Kalibrierungsparametern. Permanent installiert in einen Sägeschnitt in der Straßendecke (oder temporär mit Klebeband) und mit Epoxid (Gießbeton) in der Oberfläche gesichert, werden piezoelektrische Systeme senkrecht zur Fahrtrichtung verlegt. Sie werden sowohl für Fahrzeugwiegen, Klassifizieren, Vorselektion und statische Analysen als auch für Geschwindigkeitsmessung und Erkennung von Rotlicht Verletzungen eingesetzt [OPITZ 2007].

Das System der Fa. ECM Electronic Control Measurement (Frankreich) benutzt elektromagnetische Induktionsschleifen und zwei piezoelektrische Sensoren mit einem 3 mm starken glasfaserverstärkten Piezo-Keramik Kabel, das umhüllt wird von einer 2 x 3 cm großen Harzfüllung, die sich in einem Aluminium-Profil befindet.

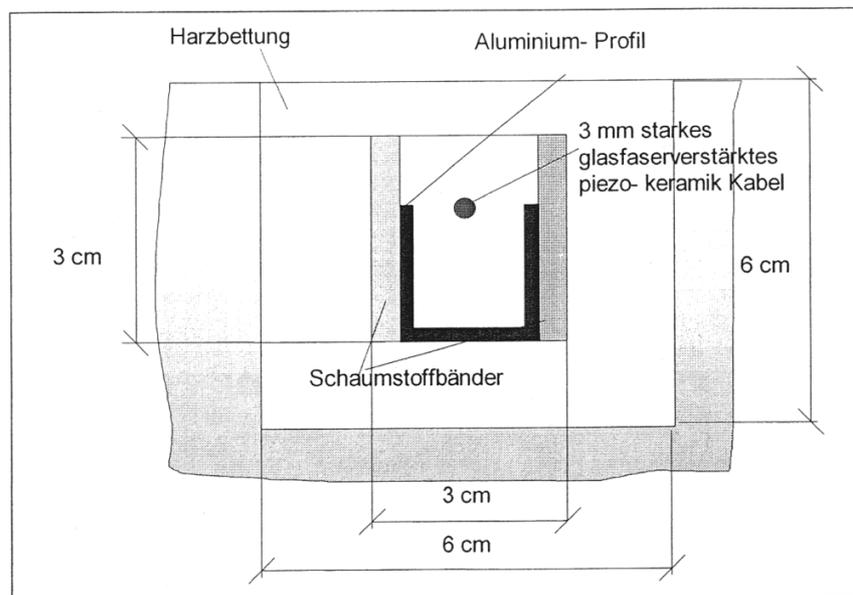


Abb. 9: Einbauschema des ECM Sensors

Der Wiegesensor der Fa. Lacroix Technologie (Frankreich) besteht aus einem 3 mm starken Piezo-Keramik Kabel, umhüllt von einer Mischung aus Bitumen und glasfaserverstärktem Epoxidharz. Der Sensor liegt in einem 6 x 6 cm großen Ausschnitt.

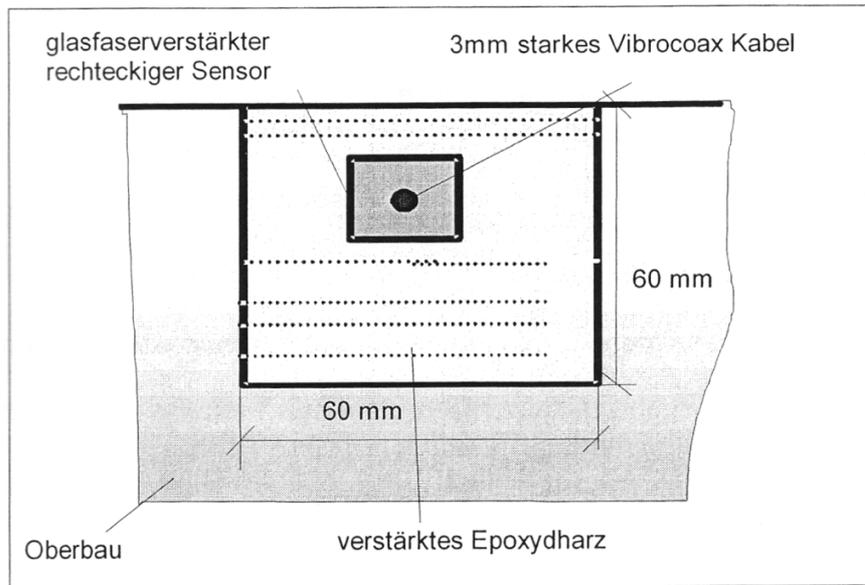


Abb. 10: Einbau des glasfaserverstärkten Balkens von Lacroix im Oberbau

Das System der Fa. Sterela/Vectra (Frankreich) besteht aus einem 8 mm starken glasfaserverstärkten Piezo-Keramik-Sensor, der in einen 3,4 m langen und 2 x 2 cm großen ausgefrästen Ausschnitt eingelegt wird und mit einem flexiblen Epoxidharz, welches das Kabel umhüllt, verklebt.

Das System der Fa. MSI, Measurement Specialities Inc. (US), besteht aus einem Piezo-Polymer-Sensor „Roadtrax BL“ geeignet für hochrangigen Verkehr. Dieser Sensor mit 2 mm Dicke und 9 mm Breite wird aufgerollt, zurechtgelegt und dann direkt in einem 30 mm tiefen und 2 mm breiten gefrästen Ausschnitt mittels Polyurethan-Harz in den Oberbau geklebt.

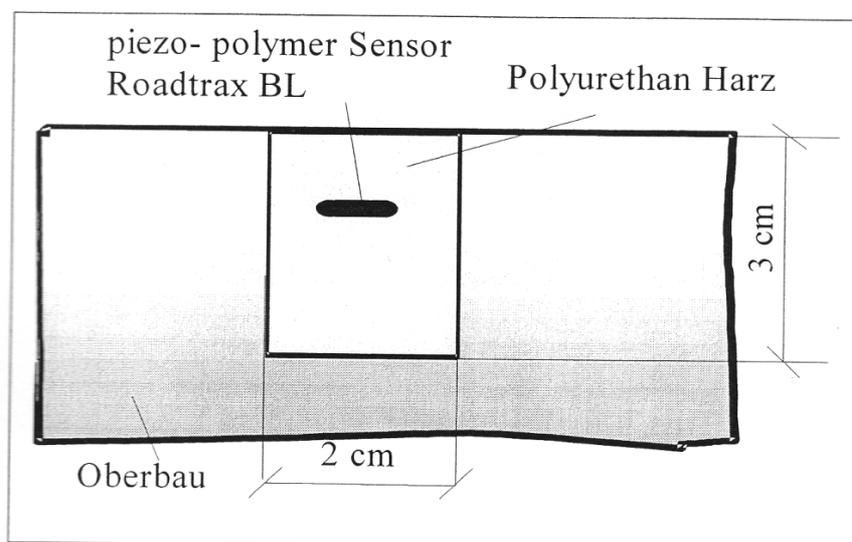


Abb. 11: Einbauschema des MSI Sensors

Die Piezosensoren werden direkt in die Straße eingebaut und liegen entweder eben mit der Straßenoberfläche oder ca. 3 mm darunter. Dieser direkte Einbau in die Straße macht den Sensor sehr stark abhängig von den auf die Straßenoberfläche einwirkenden Einflüssen und Kräften. Es sind starke Temperaturabhängigkeiten festgestellt worden, die man mit Temperatursensoren versucht auszugleichen. Durch seine einfache Herstellbarkeit und das preiswerte Material sind die Kosten des Piezosensors niedrig. Die Messgenauigkeit der Achslastmessung ist ungenau. Die Lebensdauer des Sensors ist beschränkt [OPITZ 2007].

Quarzsensoren

Der von der Fa. Kistler (Winterthur, Schweiz) in den 90er Jahren entwickelte WIM-Sensor verwendet piezoelektrische Quarzscheiben. Ein über den Sensor fahrendes Rad beaufschlagt die Quarzkristalle im Sensor mit vertikalen Kräften, praktisch ohne ihn dabei zu verformen. Die Quarzscheiben erzeugen eine elektrische Ladung proportional zu den beaufschlagten Kräften, wobei die piezoelektrische Empfindlichkeit praktisch unabhängig von Temperatur, Zeit und Geschwindigkeit ist. Da der Temperaturfehler von 1% im Temperaturbereich von 50°C zu vernachlässigen ist, findet häufig nur eine Kalibrierung pro Jahr statt, was dem Betreiber Zeit und Geld spart [4]. Gemäß TOP TRIAL Projektreport [1] bestehen allerdings Probleme dieses Sensors durch die fehlende Langzeitstabilität, die fehlende Messung des gesamten Reifenaufstandes, die Instabilität der Kalibrierung und die Übertragung hochohmiger analoger Messwerte [OPITZ 2007].

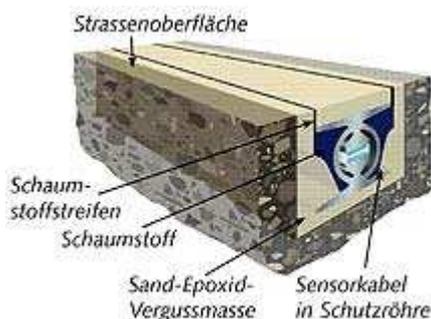


Abb. 12: Kistler Quarzsensoren

Glasfaser Sensor

Die Nutzung von Glasfasern für die Verkehrssensorik erfolgte zunächst in der Eisenbahntechnik. Die Verwendung im Straßenverkehr für Statistiksysteme zur Klassifikation von Fahrzeugen basiert auf Erkennung und Messung der Achslasten (Auswirkung der Radlast auf die Glasfaser). Die Belastung durch das Fahrzeugrad erzeugt eine Änderung der optischen Transmissionsfähigkeit (Verringerung), die gemessen (10% Änderung der optischen Transmission durch einen PKW) und in ein Signal zur Weiterverarbeitung umge-

formt wird. Glasfaser WIM Sensoren haben bisher keine Bedeutung in WIM Systemen erlangt, weil die Langzeitstabilität und die Genauigkeit noch nachzuweisen sind.

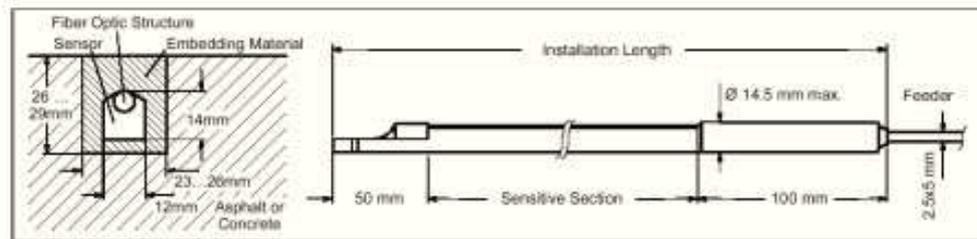


Abb. 13: Struktur Glasfaser Verkehrssensor der Fa. Sensorline

2.3 Zusammenfassung bisheriger Wiegetechnologien

Die nachfolgenden Kriterien sind bei der Auswahl und Konfiguration der dynamischen Achslastwiegesysteme zu beachten und von Bedeutung:

- technische Leistungsfähigkeit
- Langzeitstabilität der Anlagenjustierung
- Kalibrierung
- Lebensdauer der Anlage
- Kosten (Einbau und Betrieb der Anlage)
- Austauschbarkeit der Komponenten und der Sensorik

Für dynamische Achslast- und Gewichts-Statistik-Anlagen als auch zur Vorselektion haben sich vor allem die Wiegeplatten aus Stahl (Firma IRD/PAT) durchgesetzt und sind bei entsprechender Wartung zum Teil 5 - 10 Jahre im Einsatz. Dabei erlaubt die DMS Technologie die genaueste Messwerterfassung und hat somit die besten Chancen für die Anwendung in vollautomatischen Ahndungssystemen überladener Straßenfahrzeuge während der Fahrt.

Piezo-WIM-Anlagen sind am preiswertesten und werden vor allem in Frankreich und in Low-Cost Systemen benutzt, wobei allerdings die Lebensdauer unter 5 Jahren liegt und die Messtechnik deutlich ungenauer als die DMS ist [OPITZ 2007].

Quarzsensoren erreichen eine gute Genauigkeit - entsprechend den Wiegeplatten aus Stahl, lassen aber die Langzeitstabilität vermissen und mussten meistens nach einem Jahr ausgetauscht werden.

Geringere Bedeutung am Markt haben kapazitive Sensoren (CAP strips)

Nachfolgend (Tabelle 1) eine Übersicht über die verschiedenen Wiegetechnologien und ihre Anwendungen:

Tab1: Wiegetechnologien Anwendungen

Technologie und Anwendungen	Generelle Verkehrs- und Lastflussstatistiken	Detaillierte Achslast-Statistiken	Erkennung überladener Achs- und Fahrzeuggewichte	WIM in Mautstationen	Dyn. Wiegeanlage zur Ahndung bis 5 km/h bei Überladung	Hoch-Dyn. Wiegeanlage zur Ahndung bis 80 km/h bei Überladung
WIM Wiegeplatten-Sensor (DMS)	X	X	X (Selektion)	X		
Neuer dyn. WIM Matrix Sensor (DMS)		X	X (Selektion)	X	X (Zukunft)	X (Zukunft)
Wiege-Stab-Sensor Kistler (Quarz)	X	X	X	X		
Piezo Streifensensor	X					
Achsplattform (bis 5 km/h)					X Schritttempo	
Kapazitive Matte	X		X			
Glasfaser WIM Sensor	X		X			

2.4 WIM Standardisierung

Verschiedene europäische und amerikanische Standardisierungen zur Eichgenauigkeit des Wiegens von Straßenfahrzeugen während der Fahrt sind in den letzten Jahren entwickelt und angewendet worden. In Deutschland wird die TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen) bei Ausschreibungen mit WIM (Achslasterfassungsanlagen) der Straßenbaubehörden und der BASt (Bundesanstalt für Straßenbau) angewendet. Die TLS, insbesondere die Funktionsgruppe 2 (Achslasterfassung), definiert Fahrzeugtypen, Achskonfigurationen und Anforderungen an WIM Anlagen. Die TLS beinhaltet keine Definitionen für die Ahndung von überladenen Straßenfahrzeugen. Die TLS 2000 wird momentan überarbeitet und neu strukturiert.

In den USA wird vor allem die ASTM E 1318-94 verwendet, wobei sich die Definitionen und Prüfverfahren als aufwendig und teilweise nicht wirtschaftlich erwiesen. Die ASTM deckt halbautomatische Wiegestationen mit Ahndung ab.

In Europa wurde die COST 323 Aktion ins Leben gerufen und entsprechende Definitionen für WIM Anlagen erarbeitet. Die COST 323 basiert stark auf statistischen Verfahren, so-

dass der direkte Bezug zur Messgenauigkeit einer WIM Anlage nur schwer direkt nachvollziehbar ist. Die COST 323 Prozeduren wurden von der BASt übernommen und mit in die deutschen WIM Ausschreibungen integriert.

Die OIML (International Organization of Legal Metrology) beschäftigt sich seit 1999 intensiv mit der Spezifikation von Verfahren zum dynamischen Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt. Verschiedene Entwurfsdokumente wurden erarbeitet und diskutiert. Zwischenzeitlich (seit 2003) ist der Status einer „Recommendation“ für das Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt (OIML R134-1: 2003) erreicht. Im Jahre 2004 wurden die Testzertifikate (OIML R134-2-e04) zum dynamischen Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt veröffentlicht. Es ist zu erwarten, dass die Definitionen OIML R 134-1: 2003 die Basis für dynamisches WIM Enforcement werden [16].

Die jetzige Spezifikation von Genauigkeitsklassen zum dynamischen Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt ist der nachfolgenden Tabelle gemäß der OIML R 134-1: 2003 zu entnehmen. Die Testprotokolle OIML R134-2-e04 wurden im Jahre 2004 spezifiziert.

Tab.2 OIML R 134-1: 2003 Genauigkeitsklassen

Genauigkeitsklasse	Erstzulassung	In-Service Inspection
	0,2	± 0.10 %
0,5	± 0.25 %	± 0.50 %
1	± 0.50 %	± 1.00 %
2	± 1.00 %	± 2.00 %
5	± 2.50 %	± 5.00 %
10	± 5.00 %	± 10.00 %

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Zulassungsverfahren für Systeme zum Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt weit gediehen sind. Diese Richtlinie bezieht sich auf die Messung des Gesamtgewichtes von Straßenfahrzeugen während der Fahrt. Die Anlagen müssen in eine speziell überwachte Wiegezone mit Überwachung der Geschwindigkeit eingebaut sein. Für die Verwiegung von Achslasten wird vorgeschlagen, entsprechend zu verfahren.

Die OIML R134 wird bereits von einigen Herstellern für dynamisches Wiegen von Straßenfahrzeugen während der Fahrt angewendet.

Für die Zulassung von WIM-Sensoren zur Ahndung muss eine Genauigkeitsklasse kleiner zwei erreicht werden. Das bedeutet eine Messgenauigkeit bei der Erstzulassung von ± 1.00 % und im Betrieb von ± 2.00 %. Derzeit gibt es noch keine WIM-Sensoren, die für die Ahndung bei einer Geschwindigkeit von über 6 km/h zugelassen sind. Die Biegeplatte der Firma PAT und der Quarzsensor der Firma Kistler sind zwar auf Autobahnen im Einsatz

und liefern Gewichtsdaten bei Geschwindigkeiten bis 100 km/h, sind aber nur für statistische Zwecke und zur Vorselektion zugelassen, weil die Messgenauigkeit zur vollautomatischen Ahndung zu gering ist (Messgenauigkeit Gesamtgewicht 7 %, Achsgewicht 10 %). Der neue ROC WIM Sensor wird zumindest die Genauigkeitsklasse 1 erreichen [OPITZ 2007].

3 ROC WIM-Sensor

3.1 Sensor Übersicht

Wie bereits im Kapitel 1.2 ausgeführt wurde, beschäftigt sich die Firma ROC Systemtechnik seit Jahren mit der Entwicklung eines neuen WIM-Sensors, dem sogenannten Matrix-Sensor (Abb. 14).



Abb. 14: ROC Matrix-Sensor

Dieser WIM-Sensor wird statisch und voraussichtlich auch dynamisch eichfähig sein. Aufbauend auf Modulen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) in Mini-Scherkraftaufnehmern (SKA) und einer im Sensor integrierten Elektronik zur digitalen Signalverarbeitung wird eine ganze Produktfamilie entstehen.

Um das Konzept einer modular ausbaubaren Produktfamilie zu verwirklichen, wurde als Kernelement ein flaches Messmodul mit 16 Messpunkten (2 Reihen zu je 8 Messelementen) in einem 4 cm Raster konzipiert, das über CAN-Bus (Controller Area Network) sowohl in Länge als auch in Breite für verschiedene Produkte und Systemanwendungen je nach Bedarf (in Genauigkeit, Messfläche, Dynamik usw.) durch das Aneinanderreihen der Module erweitert werden kann.

Der WIM-Sensor besteht aus mehreren Scherkraftaufnehmern und einem Federband, auf dem sich ein Dehnungsmessstreifen befindet. Das WIM-Messsystem wird in der Straße bündig mit der Straßenoberfläche eingebracht. Bei der Überfahrt eines Fahrzeugs wird der Sensor durch das Gewicht des Fahrzeugs verformt. Die Verformung des Sensors bewirkt eine Änderung des elektrischen Signals im Dehnungsmessstreifen, sodass über Rückrechnung dieser Änderung das Gewicht des Fahrzeugs ermittelt werden kann.

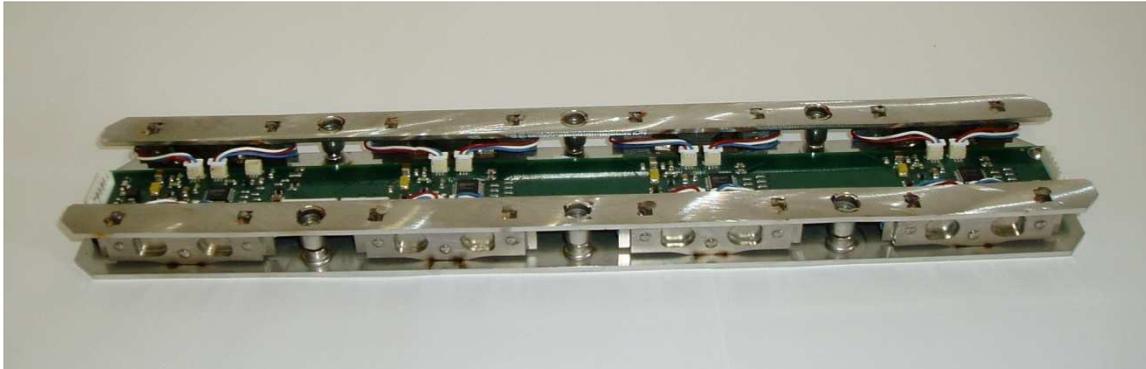


Abb. 15: Matrix Sensorstruktur (Bodenplatte, SKA mit neuer Elektronik für 16 DMS Messkanäle und CAN BUS Anschluss links und rechts)

DMS erfassen die Dehnungsänderungen in den Scherkraftaufnehmern und setzen sie in eine Widerstandsänderung um. ASICs (application specific integrated circuit) zur Signalerfassung und Digitalisierung, RISC (reduced instruction set computer) Prozessoren zur Datenaufnahme, Verarbeitung und Weiterleitung mittels CAN-Bus (Controller Area Network) als auch entsprechenden Schnittstellen zum Aufbau von Netzwerken ermöglichen die direkte Signalaufnahme und Messwertverarbeitung im Sensor und die Weiterleitung der Daten und Informationen an einen PC oder straßenseitigen Streckenrechner.

Der dynamische Wiegesensor stellt aufgrund der integrierten Mehrpunkt-Messmatrix mit eingebetteter Elektronik eine neue Generation von High-Tech Weigh-In-Motion Messmaschinen zur statischen und dynamischen Messung von Radlasten und Gewichten von Straßenfahrzeugen unter Verwendung zuverlässiger und präziser Scherkraftaufnehmer-Technologie mit DMS dar.

In der Fahrbahn werden fünf dieser Matrix-Sensoren hintereinander (Abb.16) in einer 1631 mm langen und 90 mm breiten Aluminium-Wanne (Abb. 17 und Abb.18) angeordnet.

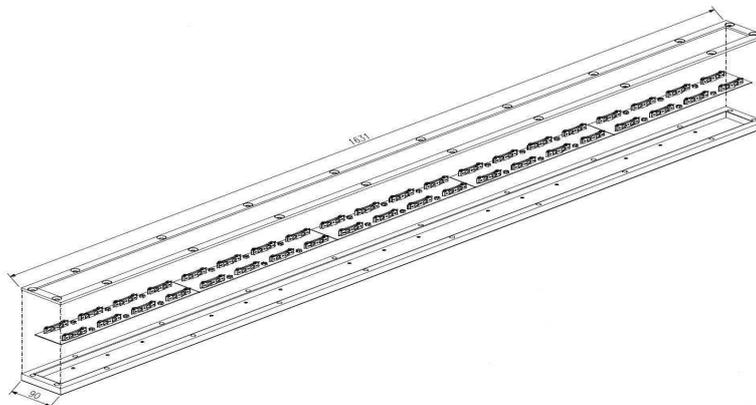
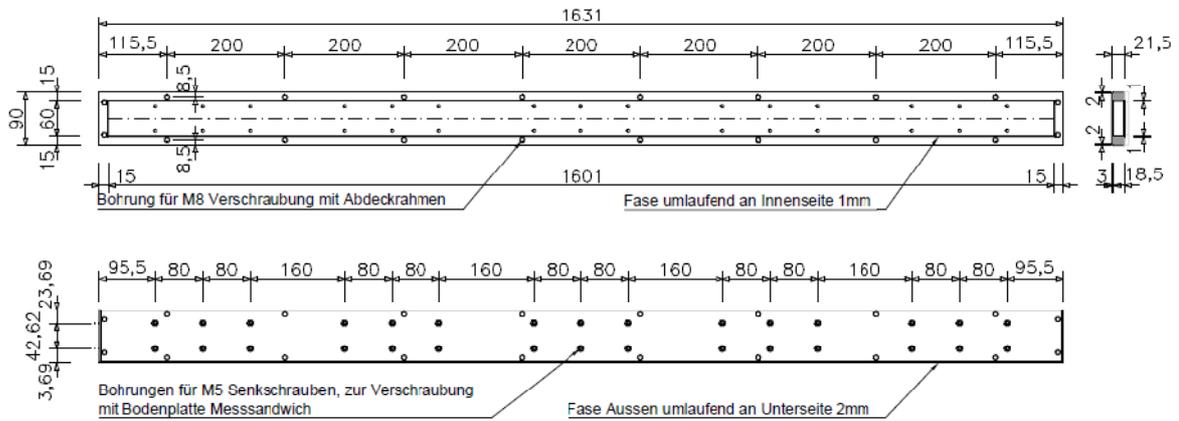


Abb. 16: Sensorwanne mit 5 Matrix Sensor Modulen



Abb. 17: Zwei Sensorwannen (links) mit Abdeckrahmen (rechts)



Abdeckrahmen Sensorwanne Aufsicht + Untersicht

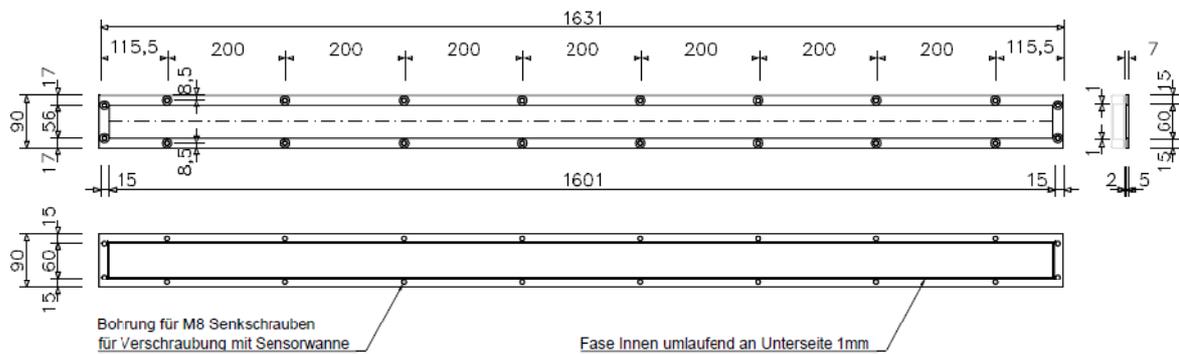


Abb. 18: Sensorwanne und Abdeckrahmen Abmessungen

Auf der Abbildung 19 ist der Gesamtaufbau der Sensormodule mit der Sensorwanne und dem Straßeneinbaurahmen dargestellt.

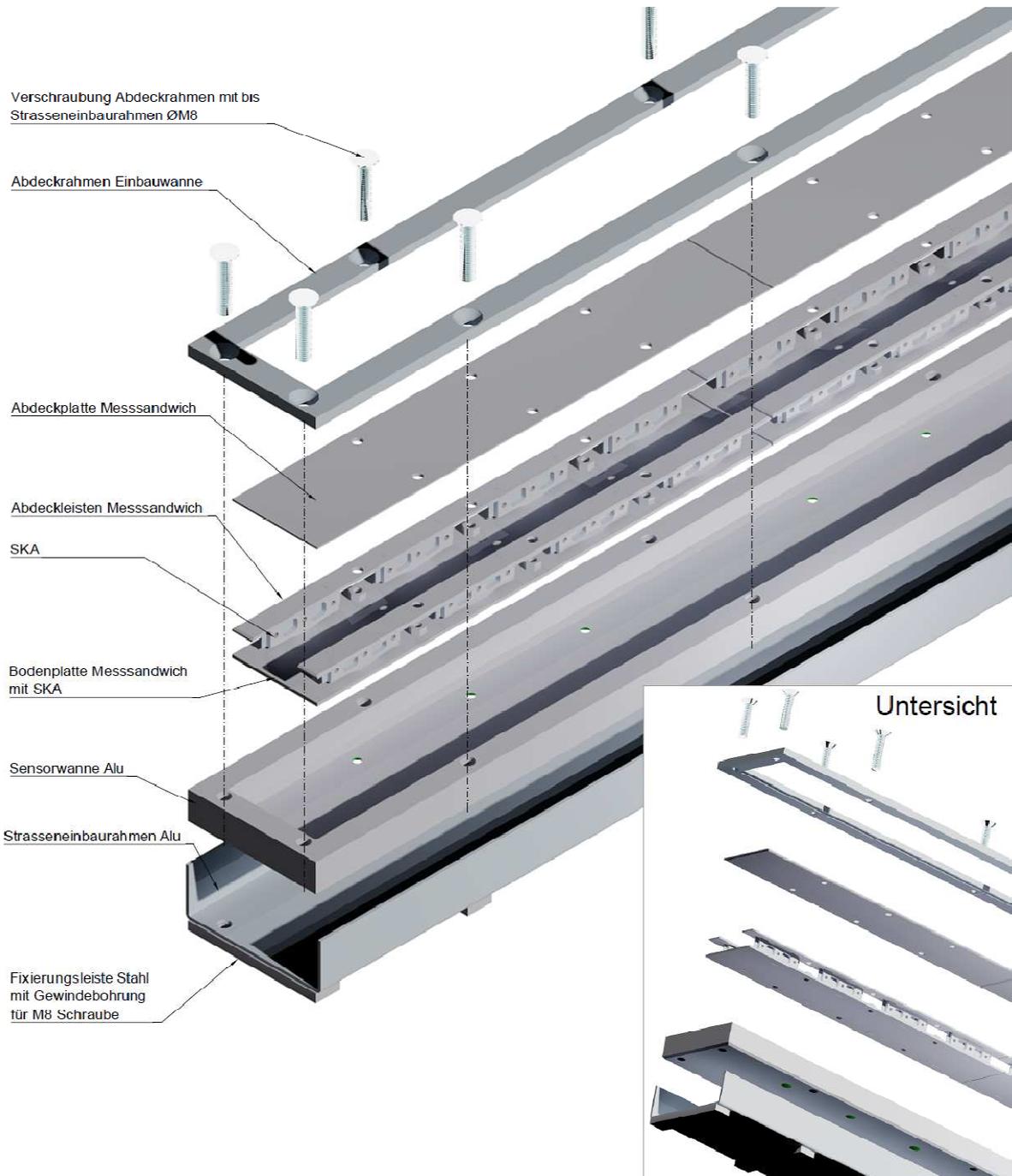


Abb. 19: Gesamtaufbau Sensormodule, Sensorwanne und Straßeneinbaurahmen

Um exakte Messungen der Fahrzeuggeschwindigkeiten und genauere Messergebnisse von Rad-, Achs- und Gesamtgewicht zu ermöglichen, werden bei der ROC Testanlage zwei Sensorreihen hintereinander eingebaut. Deren genaue Abmessungen und Abstände sind in der Abbildung 20 ersichtlich.

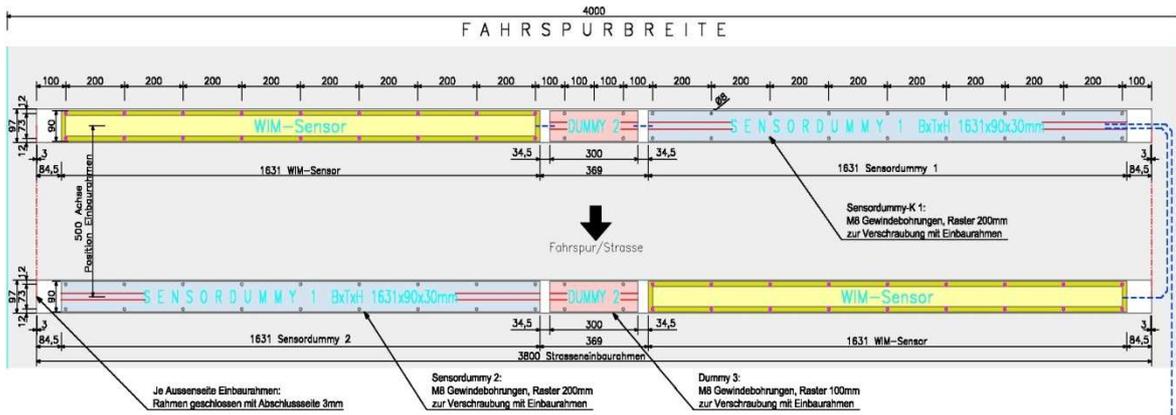


Abb. 20: Straßeneinbaurahmen

Die Abbildung 21 zeigt die zwei in der Fahrbahn eingebauten Sensorreihen.

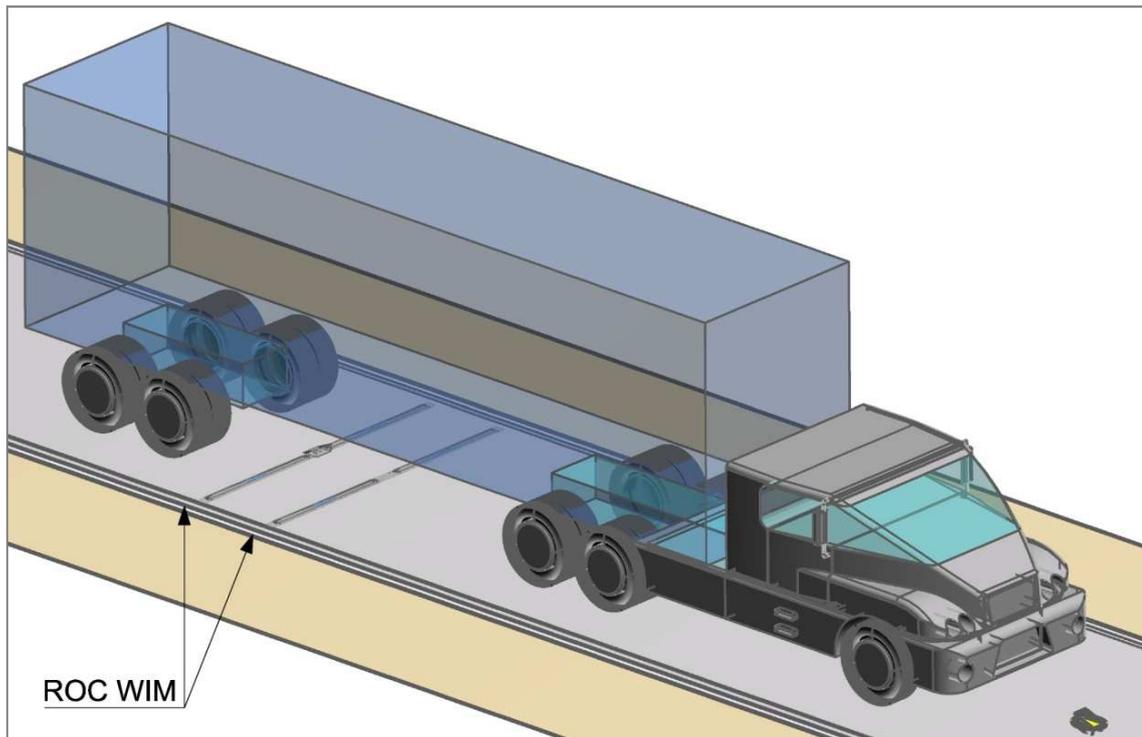


Abb. 21: ROC WIM in der Fahrbahn

Da der Sensor im Straßenverkehr extremen Belastungen wie hohen stoßartigen Lastwechseln, Temperaturschwankungen, Wasser etc. ausgesetzt ist, muss die Installation des Sensors und des Einbaurahmens sehr sorgfältig ausgeführt werden. Bei der Auswahl eines geeigneten Einbauortes ist zu berücksichtigen, dass die Straße zirka 40 m vor und 30 m hinter der Wiegeplatte eben und gleichförmig ist, die Fahrzeuge die Wiegestelle möglichst beschleunigungs- und bremsfrei überfahren können, Spurrillen beseitigt werden und LKW beim Passieren des Messpunktes nicht auf- und abfedern.

3.2 Aufbau des Matrix - Sensors

Grundsätzlich müssen eingesetzte Sensoren eine extreme Robustheit und Dauerhaftigkeit aufweisen, da sie sämtlichen Umwelteinflüssen (insbesondere Temperatur und Feuchtigkeit) sowie hohen mechanischen Ansprüchen (beispielsweise Schneepflüge und -ketten) direkt ausgesetzt sind [OPITZ et al. 2005].

Ein solches System besteht aus Grundplatte, Sensormodul und Abdeckplatte.



Abb. 22: Sensormodul mit Grund und Abdeckplatte

Die Sensormodule haben die Aufgabe, an ihren Auflagepunkten die von der Abdeckplatte übertragene Kraft aufzunehmen. Das Sensormodul besteht aus acht aneinandergereihten und gekoppelten Scherkraftaufnehmern (SKA).

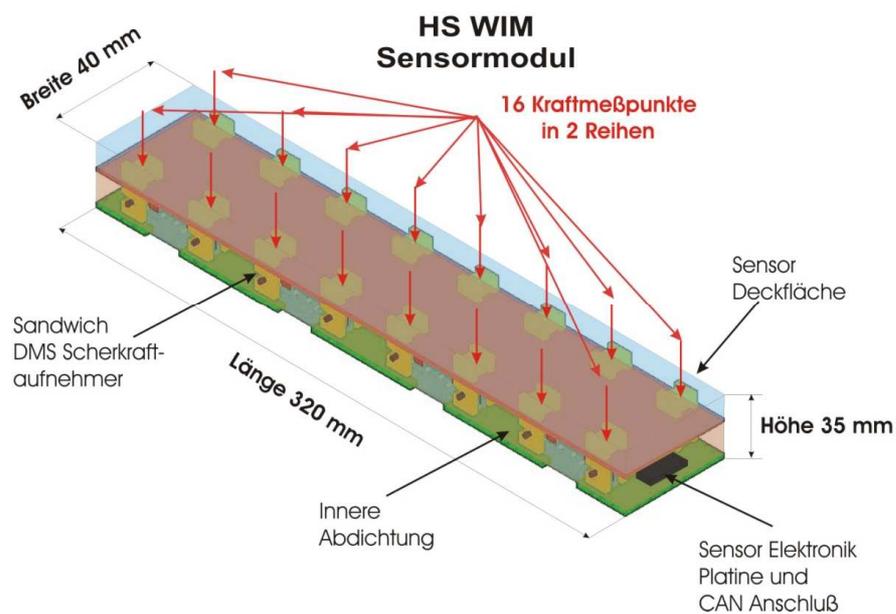


Abb. 23: ROC Matrix Sensor Prinzip

Scherkraftaufnehmer

Der von ROC konzipierte Scherkraftaufnehmer zeichnet sich durch eine sehr flache Bauweise mit zwei Außen-Sandwiches und einem eingebetteten Federband mit DMS aus.

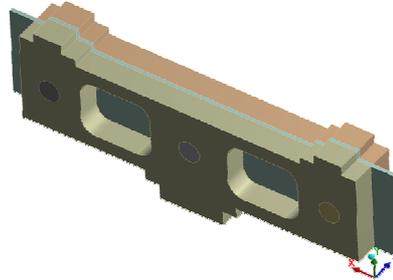


Abb. 24: Scherkraftaufnehmer

An den Stellen der maximalen Scherkräfte werden geeignete Dehnungsmessstreifen angebracht (Abb.22). Durch eine geeignete Messeinrichtung kann dann auf die Gewichtskraft geschlossen werden.



Abb. 25: Scherkraftaufnehmer Sandwich Scherkraftsensor (2 Messpunkte) mit DMS Technologie auf einen Stahlfederband

3.2.1 Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (Abk. DMS) sind Messeinrichtungen zur Erfassung von dehnen- den Verformungen. Sie ändern schon bei geringen Verformungen ihren elektrischen Widerstand und werden als Dehnungssensoren eingesetzt. Man klebt sie mit Spezialkleber

auf Bauteile, die sich unter Belastung minimal verformen. Diese Verformung (Dehnung) führt dann zur Veränderung des Widerstands des DMS [5].

Ein Dehnungsmessstreifen ist ein Sensor, dessen Widerstandswert sich mit der Ausdehnung ändert. Die Widerstandsänderung ist auf die minimale Veränderung der Leitungsstruktur im Falle der Dehnung zurückzuführen. Wird der Leiter in Längsrichtung gedehnt, wird die Leiterstruktur dünner und länger, was zu einem höheren Widerstand führt. Diese minimale Widerstandsänderung ist es, die als Messwert dient. Um die Empfindlichkeit von Dehnungsmessstreifen zu erhöhen sind sie mäanderförmig aufgebaut, wodurch der Leiter insgesamt länger wird.

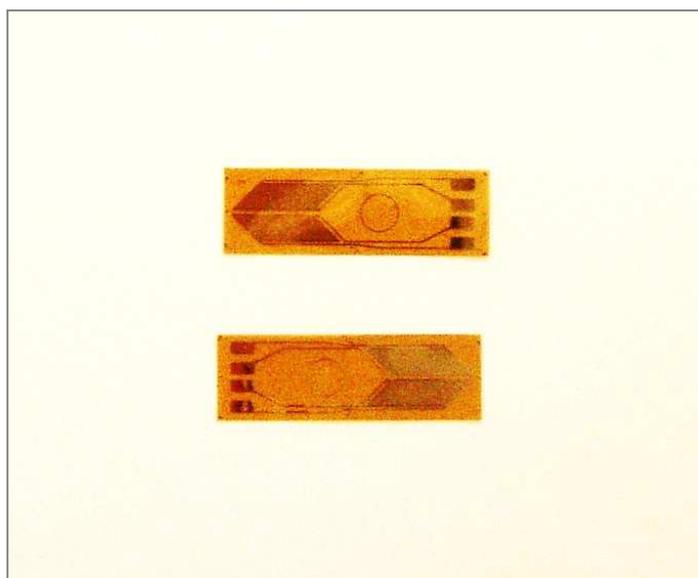


Abb. 26: Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen werden in Drucksensoren eingesetzt. Sie sind aus Metall oder Halbmateriale, vorwiegend aus Silizium und Germanium, und haben einen relativ geringen Widerstand von einigen hundert Ohm (typisch 100 Ohm bis 350 Ohm). Die Widerstandsänderung liegt bei etwa 0,1 bis 0,3 Ohm [6].

Die Vorteile von Dehnungsmessstreifen liegen in der enormen Auswahl mit verschiedenen Messgittern und Leitmaterialien aufgrund des weitverbreiteten Einsatzes in den letzten Jahrzehnten, in der Kostengünstigkeit, in den kleinen Abmessungen, in der genauesten Messwerterfassung und einfachen Austauschbarkeit.

Als Nachteile sind die beschränkte Lebensdauer mit etwa 10 Mill. Zyklen, die Empfindlichkeit auf mechanische Beanspruchung und Überdehnung, das zeitaufwendige Aufbringen eines DMS und das Risiko, dass sich der DMS bei hoher Wechselbeanspruchung vom Träger lösen kann, zu nennen [5][6].

3.3 Innovationen und Merkmale des Sensors

Nachfolgend eine Übersicht der besonderen Merkmale bzw. Innovationen des ROC Matrix-Sensors:

- möglichst hohe Genauigkeit (statisch < 1%, dynamisch < 5%)
- Stabilität der Kalibrierung (> 12 Monate)
- statische und dynamische Messung von Radlasten
- statische Kalibrierung des Sensors auch im Einbauzustand in einer Straße, vereinfachtes und preiswerteres Verfahren
- modularer Aufbau und Erweiterbarkeit
- Messung der Reifenbreite im Stand und während der Überfahrt
- Messung und Erkennung von Doppelreifen einer Achse
- Messung der Reifenaufstandsfläche auf dem Boden/Straße
- Berechnung des Flächendruckes.
- Berechnung der Homogenität des Profils und der Reifenaufgabe
- Berechnung der Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Räder eines LKW
- Berechnung der Achsbreite aus Datenverkopplung der Raumpositionen mehrerer Sensorarrays mit Verwendbarkeit zur Fahrzeugklassifizierung
- Statusmeldung des Zustandes des Sensors in der Straße (Einbaugüte) durch Rüttelmelder und Meldung zur Service-Anforderung
- verringertes Einbaumaterial beim Einbau in die Straße
- verbessertes Verfahren beim Einbau mit automatisierter Einbauvorrichtung.
- extrem flacher Einbau ohne Zerstörung der ersten tragenden Schicht der Straßendecke. Kein Biegebereich und Freiraum für den gesamten Sensor
- gute Temperaturstabilität durch eindeutige Auflagefläche (ohne Kantenaufgabe) und keine Abhängigkeit der Messwerte durch die mechanische Einspannung
- keine aufwendige Entwässerung erforderlich und daher auch keine Frostprobleme als Ursache für Messfehler und Zerstörung durch sich ausdehnendes Wasser
- digitale Bus Schnittstelle (CAN) zum Anschluss von Standardgeräten (Rechnern)
- Abbildung der Gesamtbewegung in „roll on“, „roll over“ und „roll off“ Abschnitte während der Messung auf dem Sensor
- Stillstandserfassung von Fahrzeugen auf dem Sensor mit Anzeige
- rostfreie Abdeckung des Sensors mit einer Platte aus Edelstahl
- komplette Ausführung des Sensorsgehäuses aus Bodenplatte, Rahmen und Abdeckplatte in Edelstahl als Schweißkonstruktion
- Überwachung des ordnungsgemäßen Aufstandes des Reifens/Rades bei einer statischen Verwiegung auf dem Messbereich des Sensors bei Radlastmessern

4 Entwicklung des Prüfsystems für den ROC WIM-Sensor

4.1 Problemstellung

Zur Kalibrierung und Testung des neuen Wiegesensors, wie er im letzten Kapitel beschrieben wurde, wurde von der Firma ROC Systemtechnik unter meiner Mitarbeit im Rahmen dieser Diplomarbeit eine neue Prüfvorrichtung entwickelt und gebaut. Dabei handelt es sich um eine elektrohydraulische Presse. Aufgrund des speziellen Aufbaus des neuen Matrix-Sensors mit seinen 16 Messpunkten war es notwendig, eine Vorrichtung zu konzipieren, die die Druckkraft auf alle Messpunkte gleichmäßig verteilt. Damit sollte der Matrix-Sensor exakter kalibriert und in weiterer Folge eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden können.

4.2 Entwicklungsprozess

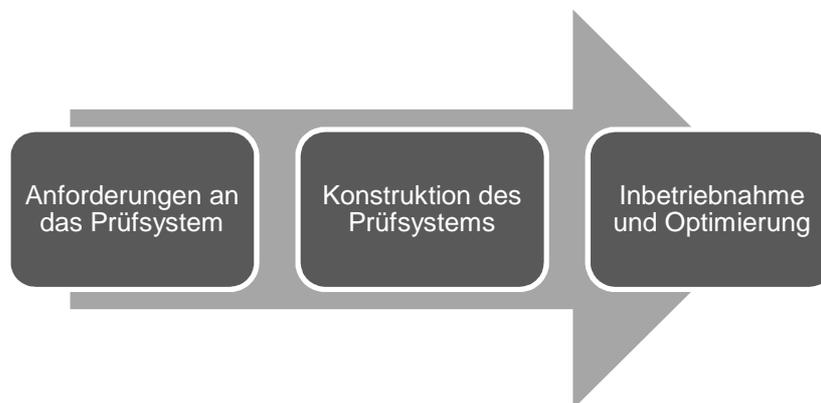


Abb. 27: Entwicklungsschritte

- Im ersten Schritt wurden die Anforderungen an das Prüfsystem definiert. Der spezielle Aufbau des neuen Matrix-Sensors mit seinen 16 Messpunkten erforderte die Entwicklung einer Vorrichtung, die die Druckkraft auf alle Messpunkte des Sensors gleichmäßig verteilt (Kraftverteiler). Zu diesem Zweck bestand die Überlegung, 16 Hydraulikzylinder zu verwenden, die miteinander kommunizierend verbunden sind und damit eine gleichmäßige Verteilung der Druckkraft ermöglichen sollten. Die Hydraulikzylinder sollten aufgrund des 4 x 4 Rasters der Messpunkte des Matrixsensors nur einen maxima-

len Außendurchmesser von 40 mm und aufgrund der vorgegebenen Rahmenkonstruktion der hydraulischen Presse eine Länge von 190 mm haben. Pro Zylinder sollte auf den Messpunkt einen maximalen Druck von 200 bar (3200 bar auf den gesamten Matrixsensor) ausgeübt werden können und möglichst geringe Reibungskräfte auftreten. Eine weitere Anforderung war, die 16 Hydraulikzylinder stabil auf jeden Messpunkt zu positionieren. Dazu sollte eine Konstruktion mit 3 Aluminium-Platten entwickelt werden, um die Zylinder in Position halten

- Im nächsten Schritt wurde der Kraftverteiler mit dem Auto-CAD-Programm in verschiedenen Varianten entworfen und konstruiert. Bei verschiedenen Anbietern wurden entsprechende Angebote für Hydraulikzylinder und –komponenten eingeholt und geprüft. Nach ausführlichen Planungen und Überlegungen fiel die Wahl auf die Fa. Hydro-Cardan [7], die die passenden Zylinder und die nötigen Hydraulikkomponenten lieferte sowie die Installation des Hydrauliksystems vornahm.
- Im letzten Schritt erfolgte die Inbetriebnahme und Optimierung der Prüfvorrichtung. Das System wurde so konstruiert, dass es mittels Hydraulikhandpumpe oder alternativ mit einem Kompaktaggregat betrieben werden kann und die Geschwindigkeit des Hydraulikzylinders reduzierbar ist, womit genauere Messungen möglich werden.

4.3 Gesamtaufbau des Prüfsystems

Die Abb. 28 zeigt den Prototypen des neu entwickelten Prüfsystems für den ROC Matrix Sensor.

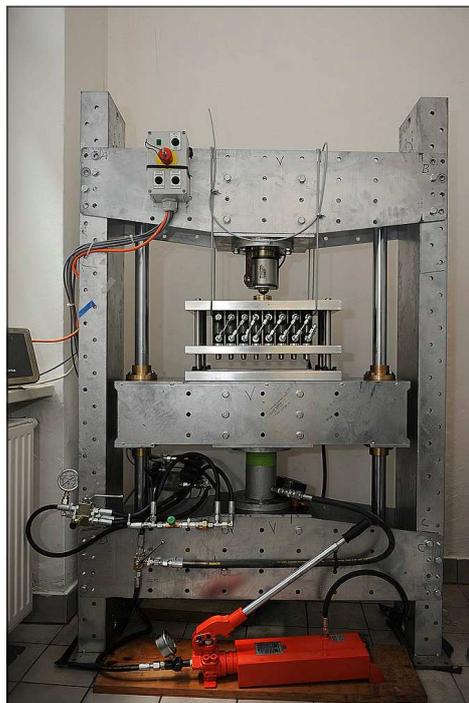


Abb. 28: Prüfsystem ROC Systemtechnik

Auf der Abb. 29 ist die gesamte Prüfvorrichtung als 3-D-CAD-Zeichnung dargestellt.

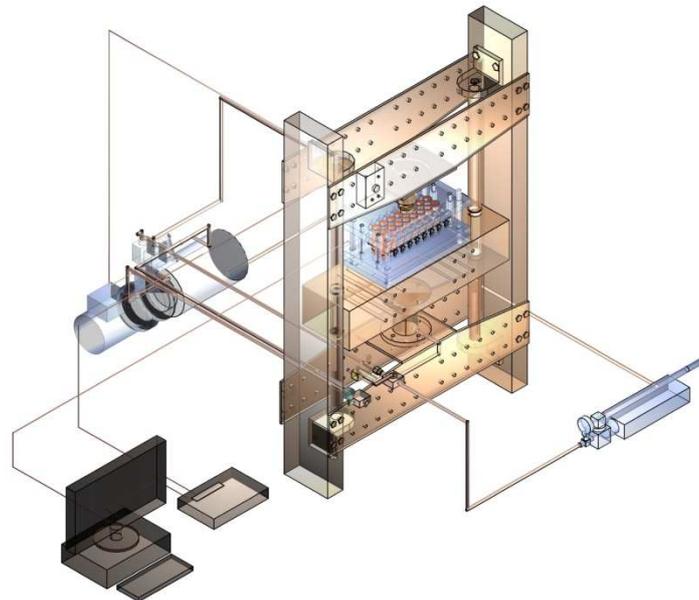


Abb. 29: Gesamtaufbau Prüfvorrichtung, 3D Isometrie (Pavlov 2010)

Abb. 30 zeigt den detaillierten Aufbau des gesamten Prüfsystems aus den einzelnen Subsystemen.

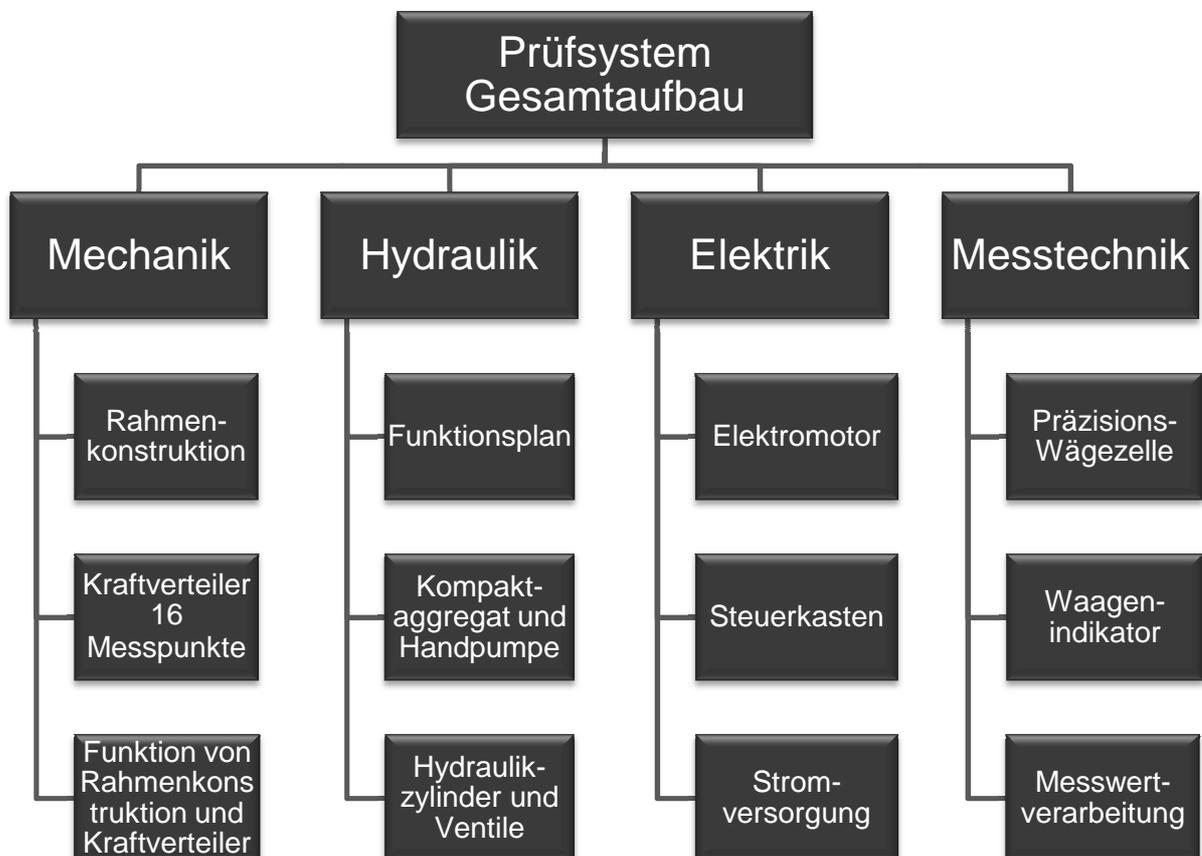


Abb. 30: Prüfsystem Gesamtaufbau

Gesamtaufbau Details

Die Grundfunktionen des Systems werden anhand von Abb. 31 beschrieben. Der Hydraulikzylinder (Nr.4) bewegt den Hubwagen (Nr.5) entlang von zwei Führungsstäben an der Rahmenkonstruktion (Nr.1) nach oben. Der Hydraulikzylinder kann entweder elektrisch mittels Kompaktaggregat (Nr.2) oder mechanisch mittels Handpumpe (Nr.3) angesteuert werden. Wird ein höherer Druck benötigt als das Kompaktaggregat zulässt (170 Bar), kann daher alternativ mit der Handpumpe gearbeitet werden. Die Umschaltung zwischen Kompaktaggregat oder Handpumpe erfolgt über den Dreiwegehahn (Nr.10). Das Kompaktaggregat steuert neben dem Hydraulikzylinder auch die 16 Zylinder des Kraftverteilers (Nr.8). Dies geschieht über den Steuerungskasten (Nr.7). Die Steuerung der Zylindergruppen sollte nicht gleichzeitig erfolgen, damit eindeutige Bewegungsabläufe sichergestellt sind. Mit dem Druckbegrenzungsventil (Nr.11) kann der Pressdruck während des Pressvorganges feinfühlig variiert werden. Der maximale Arbeitsdruck ist am Hauptdruckventil des Kompaktaggregats eingestellt bzw. kann vom Betreiber dort eingestellt werden. Die Geschwindigkeit des Hydraulikzylinders ist mit dem Drosselventil (Nr.12) reduzierbar. Der Durchfluss ist druckabhängig. Das bedeutet höhere Zudosierung bei höherem Arbeitsdruck und umgekehrt. Der Rücklauf des Ölstromes aus dem Hydraulikzylinder erfolgt ungedrosselt über den Kugelhahn (Nr.14), weil das Rückschlagventil (Nr.13) den Rückstrom über das Drosselventil verhindert. Das ermöglicht eine schnellere Entlastung des Hydraulikzylinders. Die auftretende Druckkraft verteilt sich anschließend auf die 16 Zylinder des Kraftverteilers (Nr.8), die kommunizierend verbunden sind und daher bei gleichem Druck gleiche Kräfte an der Kolbenstange abgeben. Zuletzt wird die Druckkraft an der Präzisions-Wägezelle (Nr.6) gemessen und am Waagenindikator (Nr.15) abgelesen. Mithilfe moderner Software werden die Messergebnisse am PC dargestellt (Nr.16).

Der ROC Matrix-Sensor (Nr.9) mit seinen 16 Messpunkten befindet sich zur Prüfung im Kraftverteiler, wobei auf jeden einzelnen Messpunkt aufgrund der 16 Zylinder nur 1/16 der gesamten Druckkraft einwirkt.

- | | | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| ① Rahmenkonstruktion | ⑦ Steuerkasten | ⑬ Rückschlagventil |
| ② Kompaktaggregat | ⑧ Kraftverteiler | ⑭ Kugelhahn |
| ③ Handpumpe | ⑨ ROC-WIM Sensor | ⑮ Sartorius Waagenindikator |
| ④ Hydraulikzylinder | ⑩ Dreiwegehahn | ⑯ PC |
| ⑤ Hubwagen | ⑪ Druckbegrenzungsventil | |
| ⑥ Sartorius Wägezelle | ⑫ Drosselventil | |

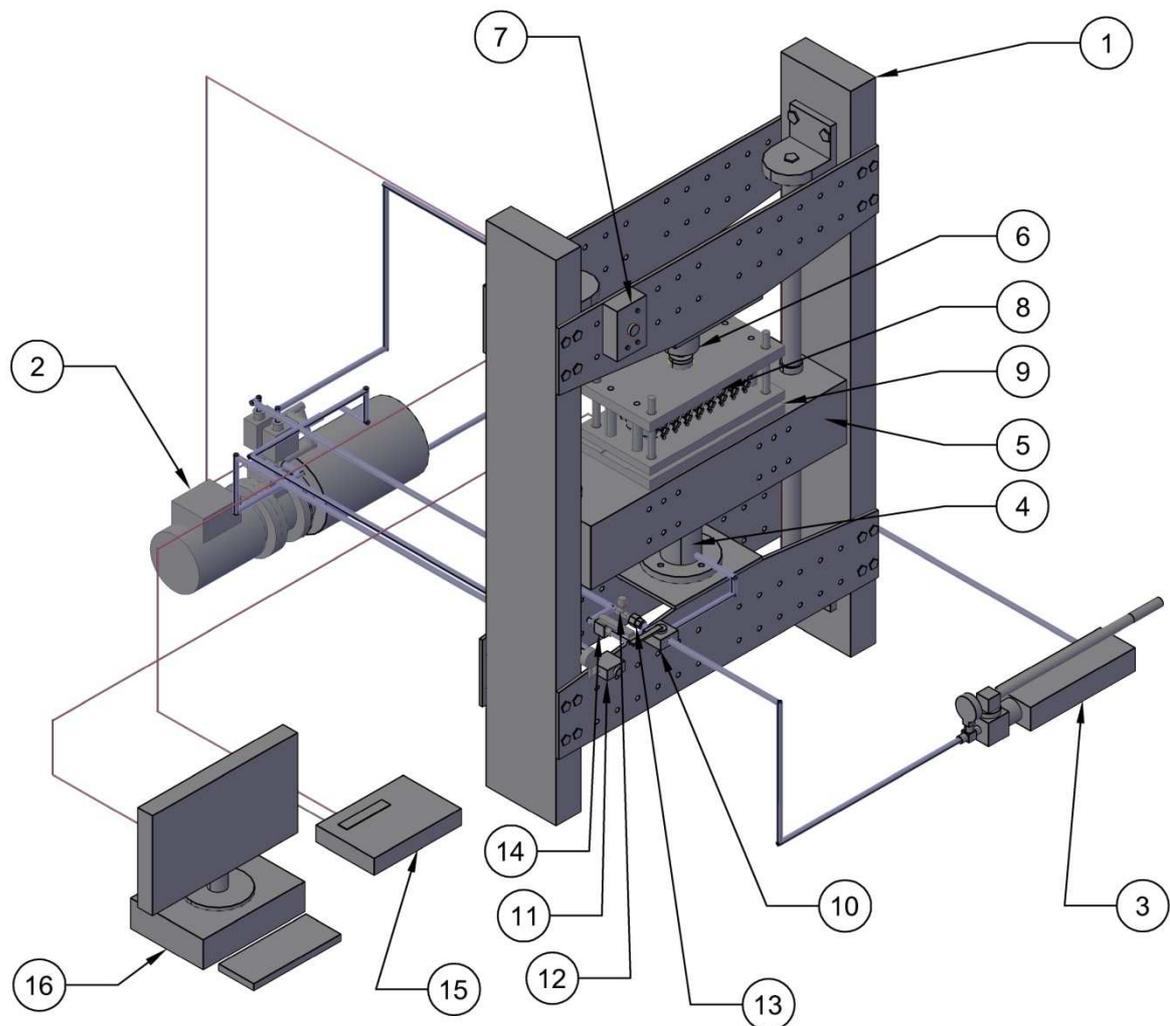


Abb. 31: ROC Systemtechnik Prüfvorrichtung Details (Pavlov 2010)

4.4 Mechanik

4.4.1 Rahmenkonstruktion

Die Rahmenkonstruktion (Abb. 32) wurde von der Firma ROC selbst entwickelt und gebaut. Sie ist 170 cm hoch, 110 cm breit und 26 cm tief. Sie besteht aus Stahl und ist für 20 Tonnen Druckkraft geeignet. Der Hydraulikzylinder ist fix an der Rahmenkonstruktion montiert und dient dazu, den Hubwagen entlang der Führungsstäbe nach oben zu drücken. Die Sartorius-Präzisions-Wägezelle ist ebenfalls fix an der Rahmenkonstruktion befestigt.

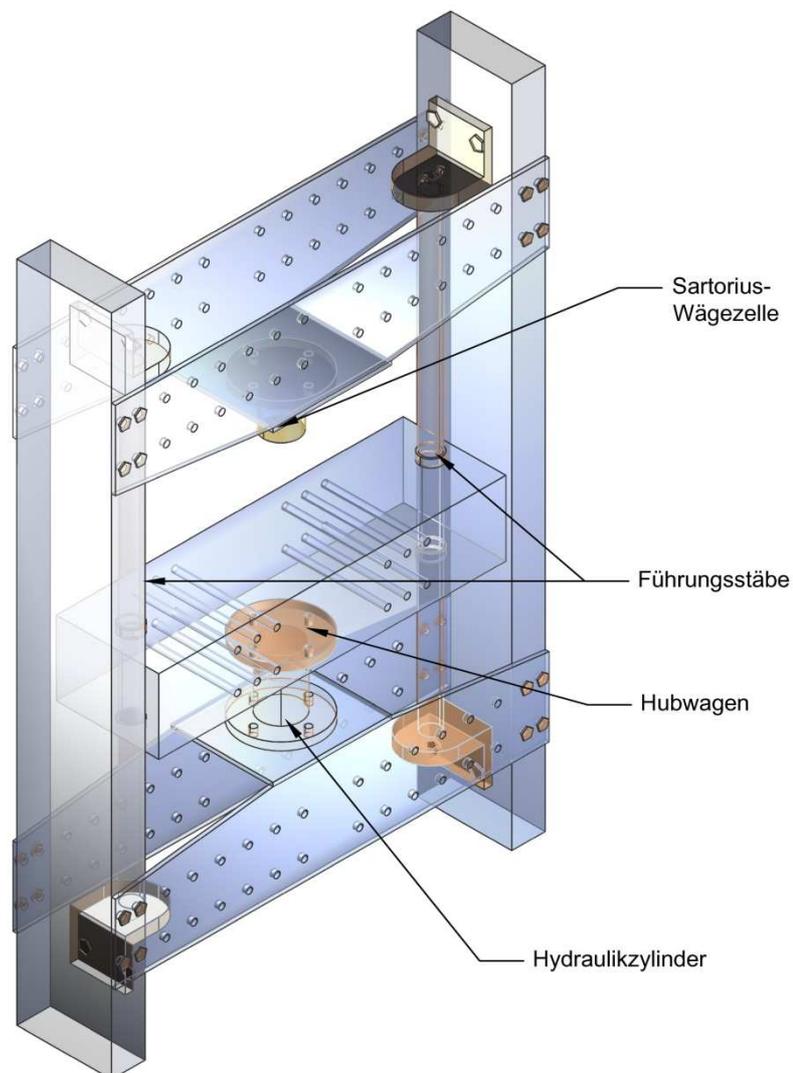


Abb. 32: Rahmenkonstruktion in 3 D (Pavlov 2010)

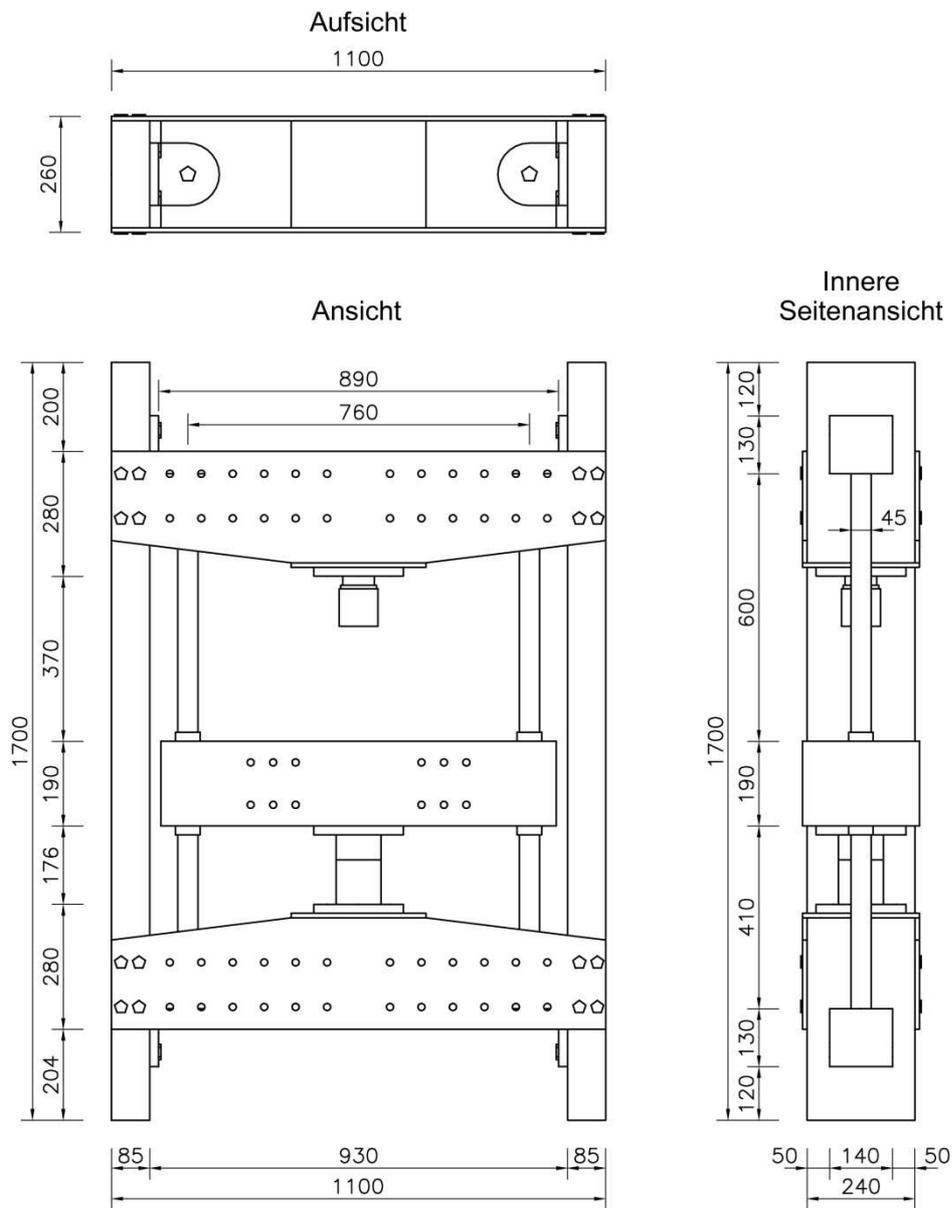


Abb. 33: Abmessungen Rahmenkonstruktion (Pavlov 2010)

4.4.2 Kraftverteiler

Aufgrund des speziellen Aufbaus des neuen Matrix-Sensors mit seinen 16 Messpunkten wurde ein Kraftverteiler mit 16 kommunizierend verbundenen Hydraulikzylindern konstruiert, mit dem Ziel die Druckkraft auf alle Messpunkte des Sensors gleichmäßig zu verteilen. Die Hydraulikzylinder sollten aufgrund des 4 x 4 Rasters des Matrix-Sensors nur einen Maximaldurchmesser von 40 mm haben. Ferner sollte pro Zylinder eine Druckkraft von 200 bar ausgeübt werden können. Bei der Firma Hydro-Cardan [7] wurden 16 Stück doppelwirkende Zylinder mit einem Außendurchmesser von 35 mm und einer Länge (ohne Hub) von 135 mm bestellt, die auf Einzelwirkungsfunktion umgebaut wurden (siehe Kap. 4.9 Probleme und Lösungen). Der Hub beträgt 50 mm. Die Zylinder sind kommunizierend mit Rohren verbunden. Die Verrohrung wurde ebenfalls von der Fa. Hydro-Cardan durchgeführt.

Um die 16 Zylinder stabil auf jeden Messpunkt zu positionieren, wurde eine Konstruktion mit 3 Aluminium-Platten entwickelt (Abb.34).



Abb. 34: ROC Systemtechnik Kraftverteiler

Auf der Abb. 35 ist der neu konstruierte Kraftverteiler als 3-D-CAD-Zeichnung dargestellt.

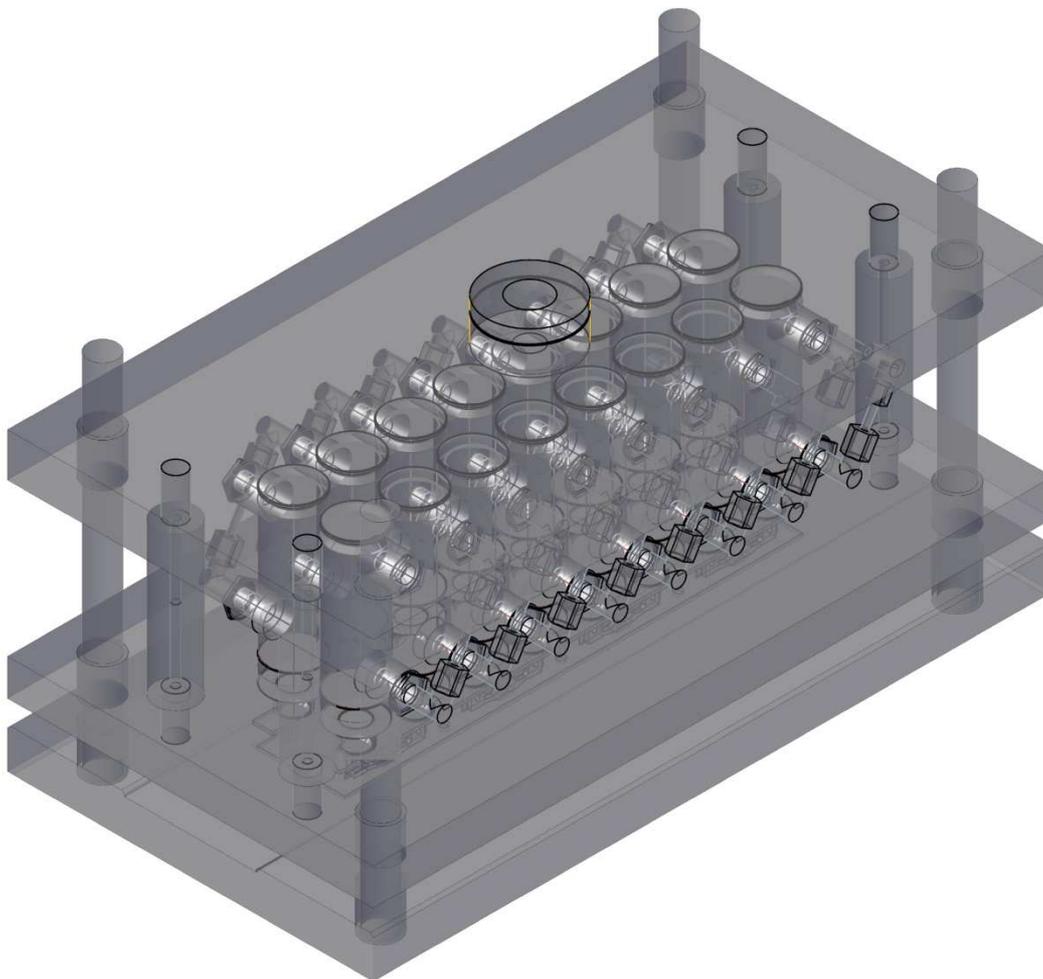


Abb. 35: ROC Systemtechnik Kraftverteiler 3D Ansicht Isometrie (Pavlov 2010)

Die Hydraulikzylinder sind zwischen zwei Aluminiumplatten, der Platte 2 und Platte 3 (Abb. 36), fixiert. Die zwei Platten sind mittels Fixierungsbolzen festgeschraubt. Durch spezielle Löcher in den Platten wird der Abstand und die Position der Zylinder stabil gehalten. Die Basisplatte, Platte 1, (Abb.36) ist mit der Mittelplatte über Verbindungsrohre in der vertikalen Richtung beweglich verbunden. Auf der Basisplatte befindet sich eine rechteckige Vertiefung, in der der Matrix-Sensor bei den Messungen aufliegt. Sämtliche Kanten an den Platten sind zur Verminderung der Verletzungsgefahr abgerundet. Die genauen Details der drei Platten sind auf den Abbildungen 40 bis 42 dargestellt.

Die Zylinder werden über das Kompaktaggregat gesteuert. Mit dem Kraftverteiler wird auf den Messsandwich kein Druck ausgeübt, sondern er dient ausschließlich der gleichmässigen Verteilung der gesamten Druckkraft.

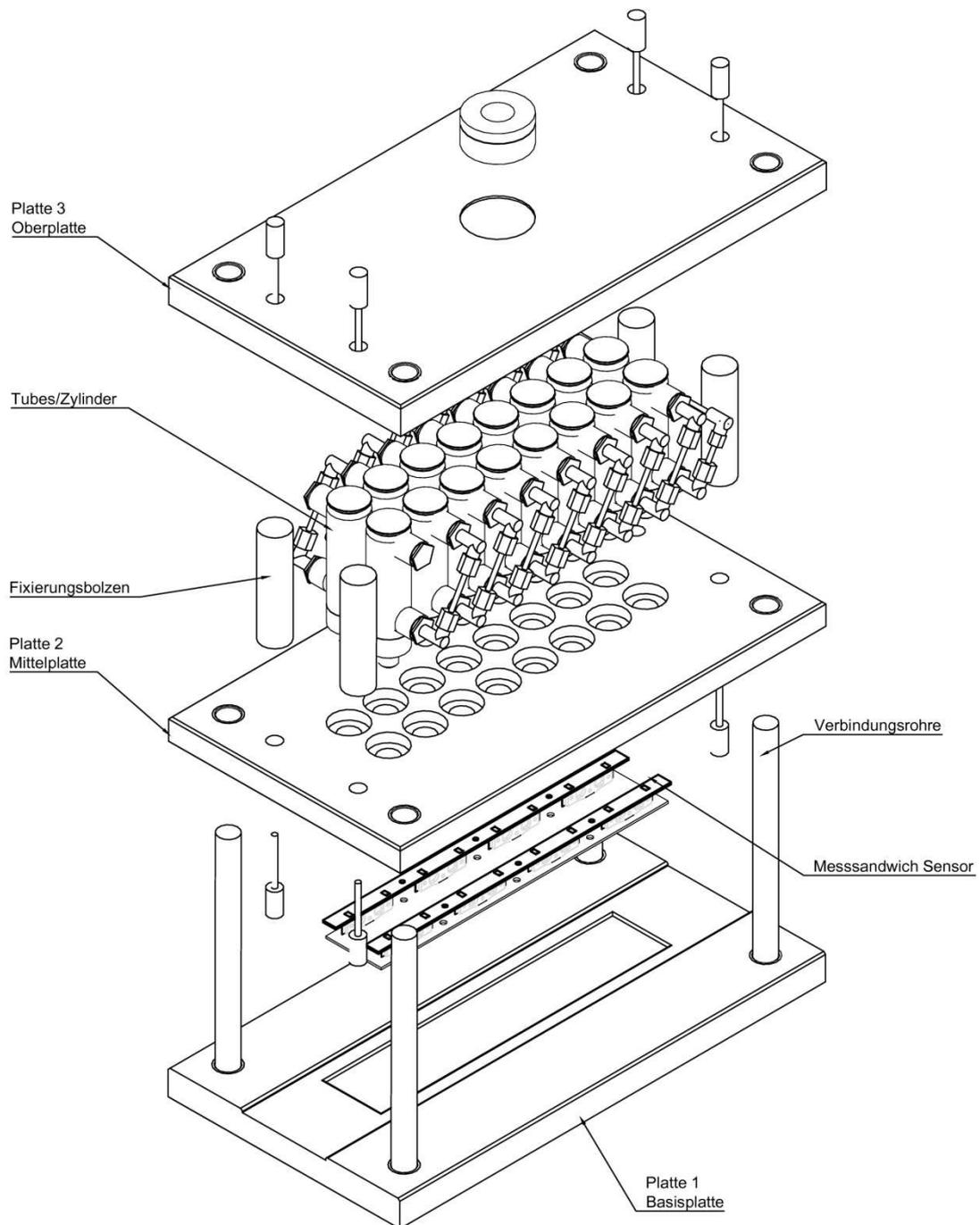


Abb. 36: Kraftverteiler Explosionsansicht (Pavlov 2010)

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen den Aufbau des Kraftverteiler in verschiedenen 3-D Ansichten.

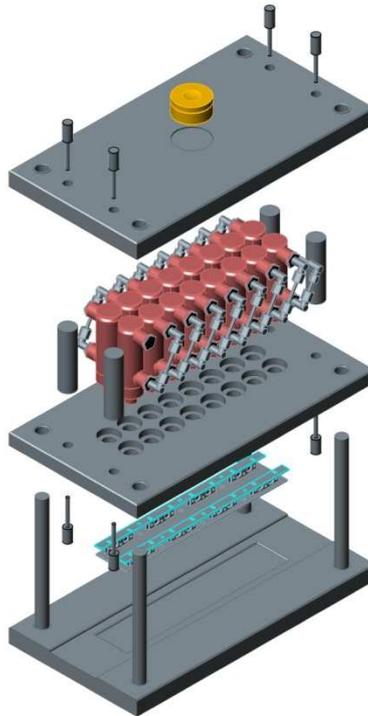


Abb. 37: Kraftverteiler Explosionsansicht (Pavlov 2010)

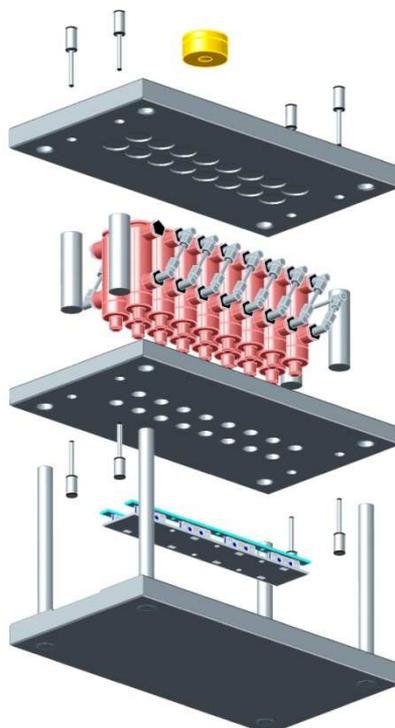


Abb. 38: Kraftverteiler Explosionsansicht Untersicht (Pavlov 2010)

Die Abb. 39 zeigt die genauen Abmessungen des Kraftverteilers: Länge 464 mm, Breite 250 mm, Höhe 250 mm.

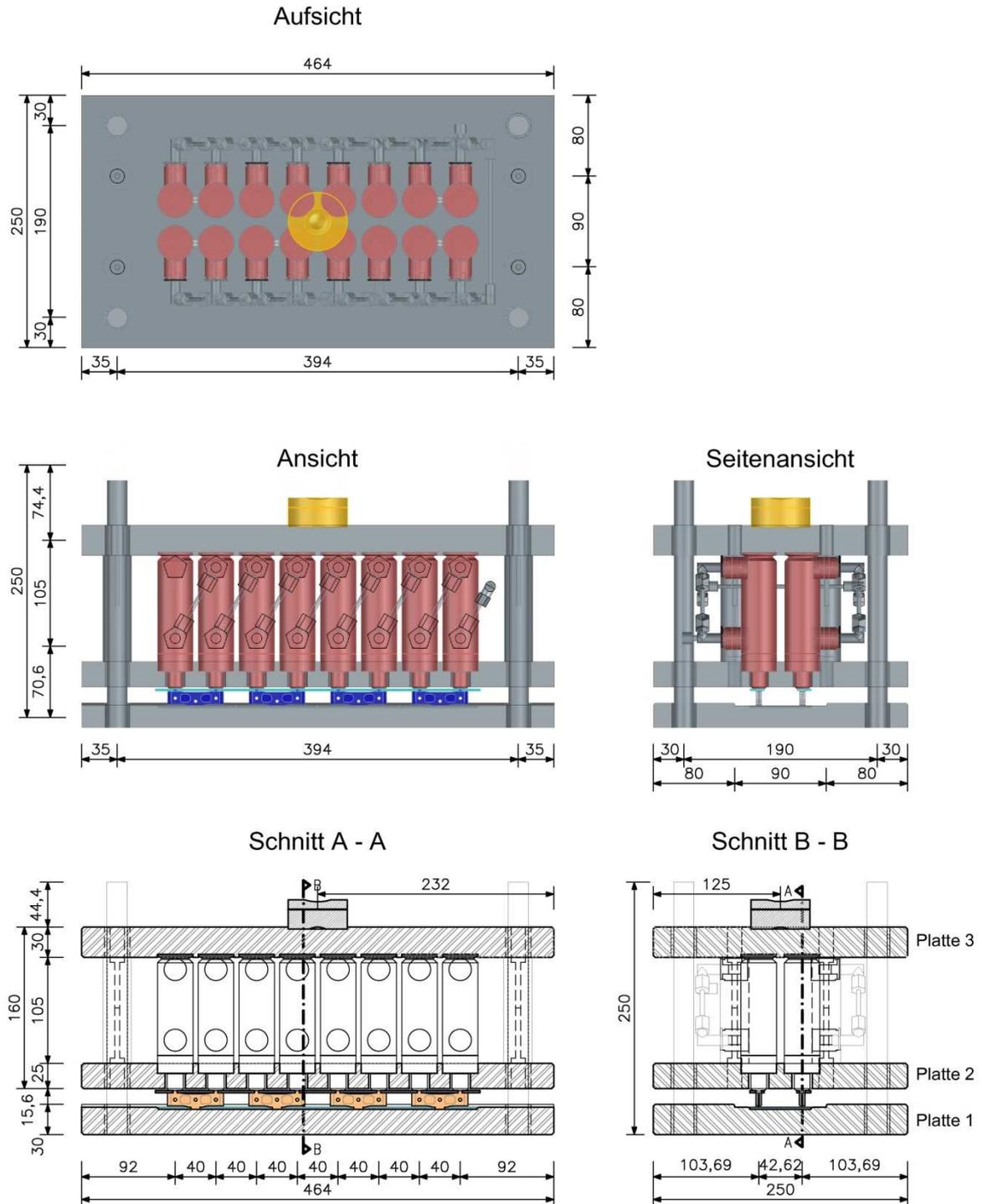


Abb. 39: Kraftverteiler Abmessungen (Pavlov 2010)

Kraftverteiler Details

Die Basisplatte (Abb.40) ist 464 mm lang, 250 mm breit und 30 mm stark. Die 5 mm messende Vertiefung in der Mitte ist 313 mm lang und 60 mm breit mit einer Toleranz von 0,2 mm und entspricht somit den Abmessungen des zu prüfenden ROC-Matrix-Sensors. Eine durchgehende 3 mm tiefe, 90 mm breite Vertiefung ist für eine mögliche Prüfung der Sensorwanne mit fünf hintereinandergeschalteten Matrix-Sensoren, wie sie auf Abb.16 auf Seite 29 dargestellt ist, vorgesehen. In den vier Löchern in den Ecken mit einem Durchmesser von 25 mm sind die Verbindungsrohre zur Platte 2 und 3 fixiert.

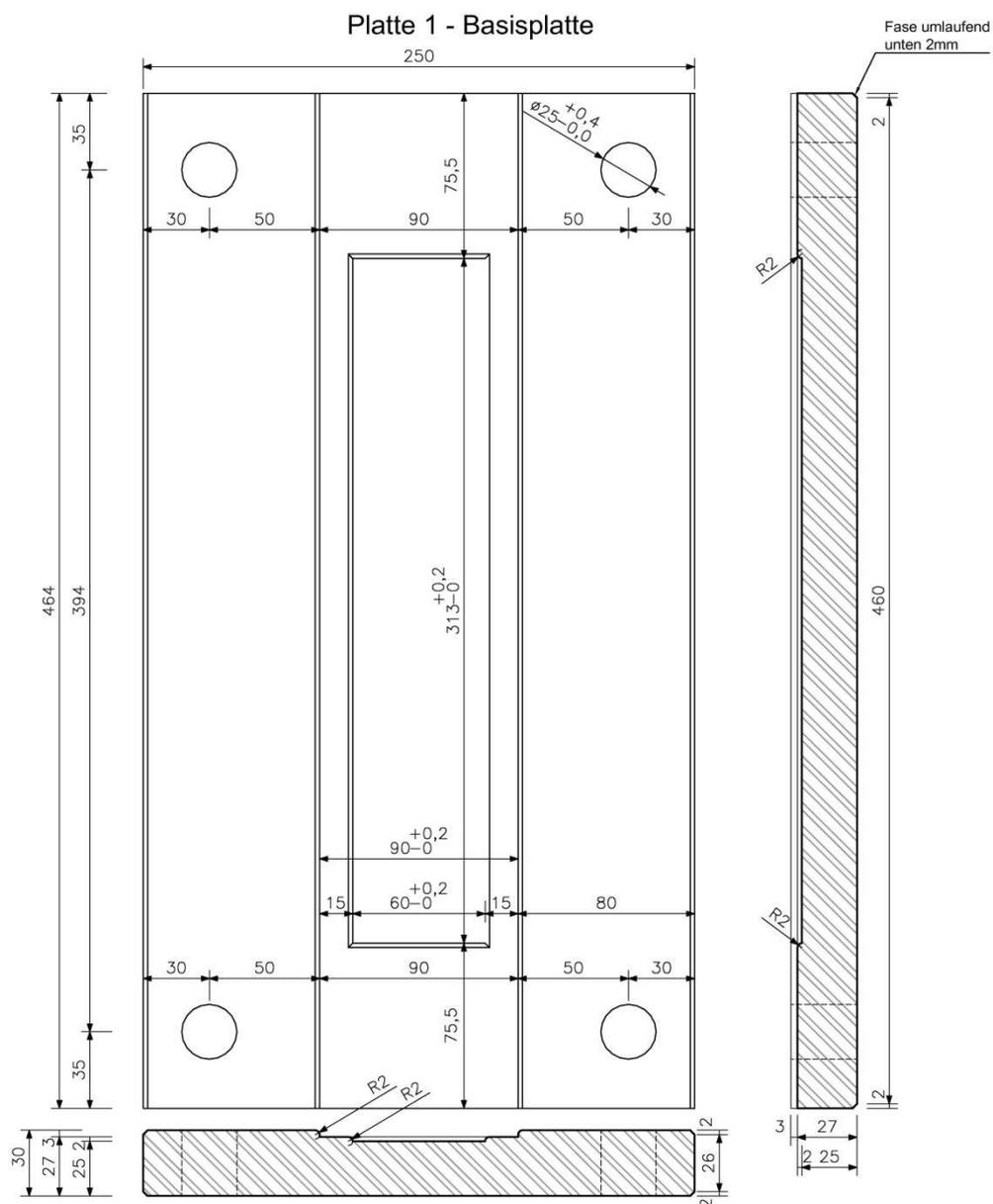


Abb. 40: Platte 1 – Basisplatte (Pavlov 2010)

Die Oberplatte (Abb. 42) ist 464 mm lang, 250 mm breit und 30 mm stark. Die Platte ist mit 16 2 mm tiefen Einfräsungen versehen, die zur Aufnahme der Hydraulikzylinder in zwei Reihen zu je acht angeordnet sind. Die Einfräsungen sind im gleichen Raster wie die Löcher der Mittelplatte - 40 mm in der Längsrichtung und 42,62 mm in der Breitrichtung – platziert. Die vier Löcher an der Breitseite mit einem Durchmesser von 14 mm dienen den Fixierungsbolzen, mit denen die Oberplatte und Mittelplatte zusammengeschaubt sind. Durch die Einfräsungen der Oberplatte, Löcher der Mittelplatte und die Fixierungsbolzen werden die Hydraulikzylinder unbeweglich fixiert. Durch die vier Löcher in den Ecken mit einem Durchmesser von 25 mm ziehen die Verbindungsrohre. Damit können sich die Ober- und Mittelplatte samt dem Zylinderblock in vertikaler Richtung bewegen. An der Oberseite der Oberplatte befindet sich in der Mitte eine kreisförmige, 2 mm tiefe und 58 mm im Durchmesser haltende Einfräsung. Sie dient der Aufnahme des Metallzylinders, der ein Bestandteil der Sartorius Wägezelle ist.

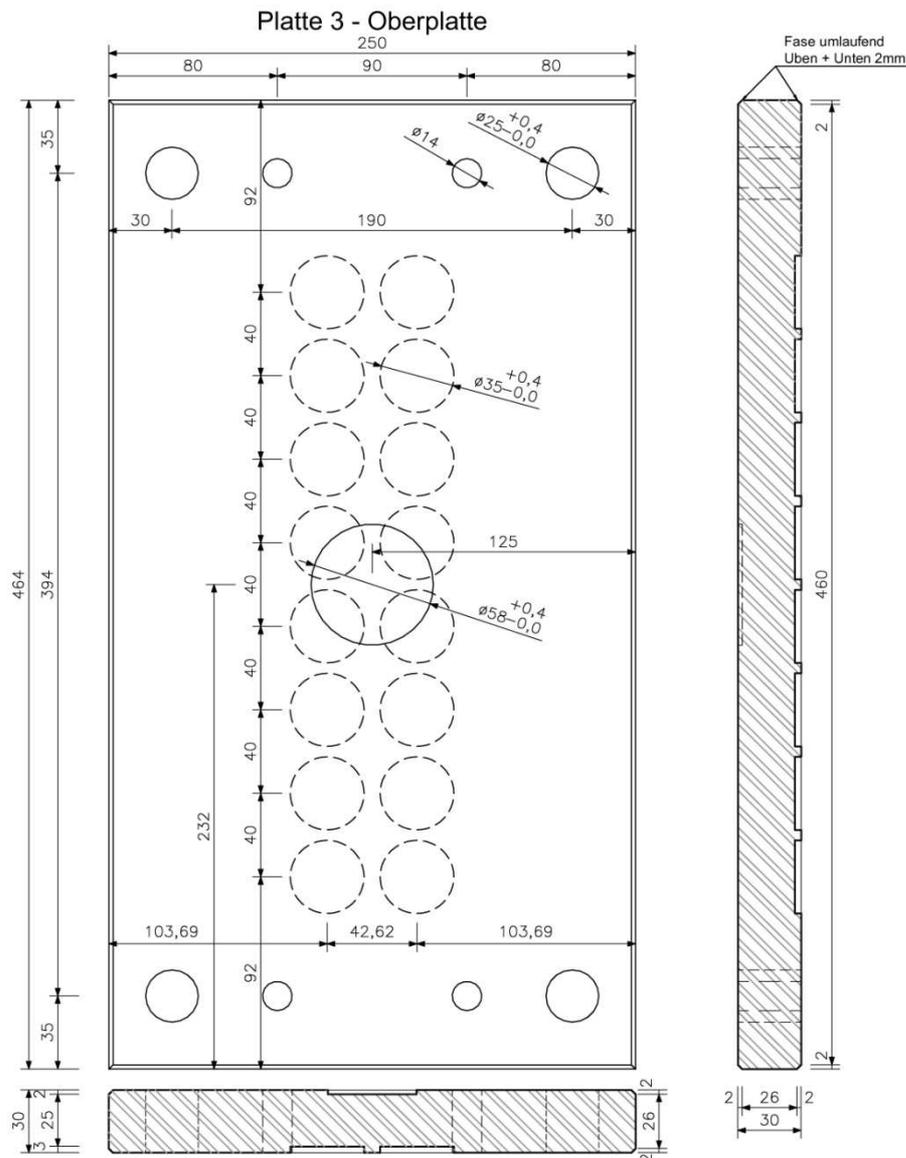


Abb. 42: Platte 3 – Oberplatte (2010)

4.4.3 Funktion von Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler

Auf der Abbildung 43 ist die Rahmenkonstruktion und der Kraftverteiler als 3-D-CAD-Zeichnung dargestellt.

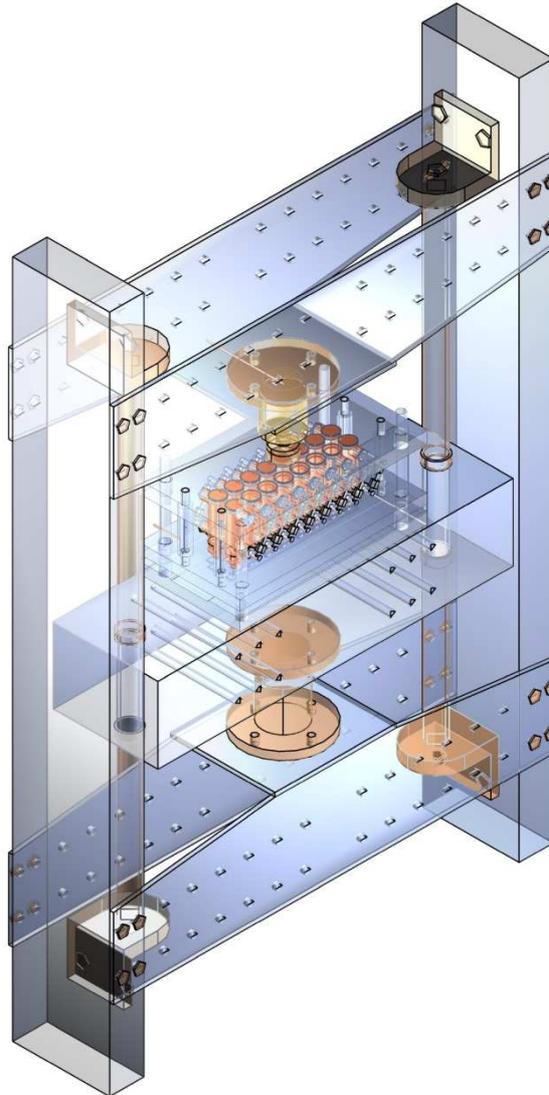


Abb. 43: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler (Pavlov 2010)

Der Kraftverteiler liegt auf dem Hubwagen (Abb.44) der Rahmenkonstruktion. Der Hydraulikzylinder drückt den Hubwagen (Abb.44) entlang von zwei Führungsstäben (Abb.44) nach oben. Die auftretende Druckkraft verteilt sich anschließend auf die 16 Zylinder des Kraftverteilers (Abb.44), die kommunizierend verbunden sind und daher bei gleichem Druck gleiche Kräfte an der Kolbenstange abgeben.

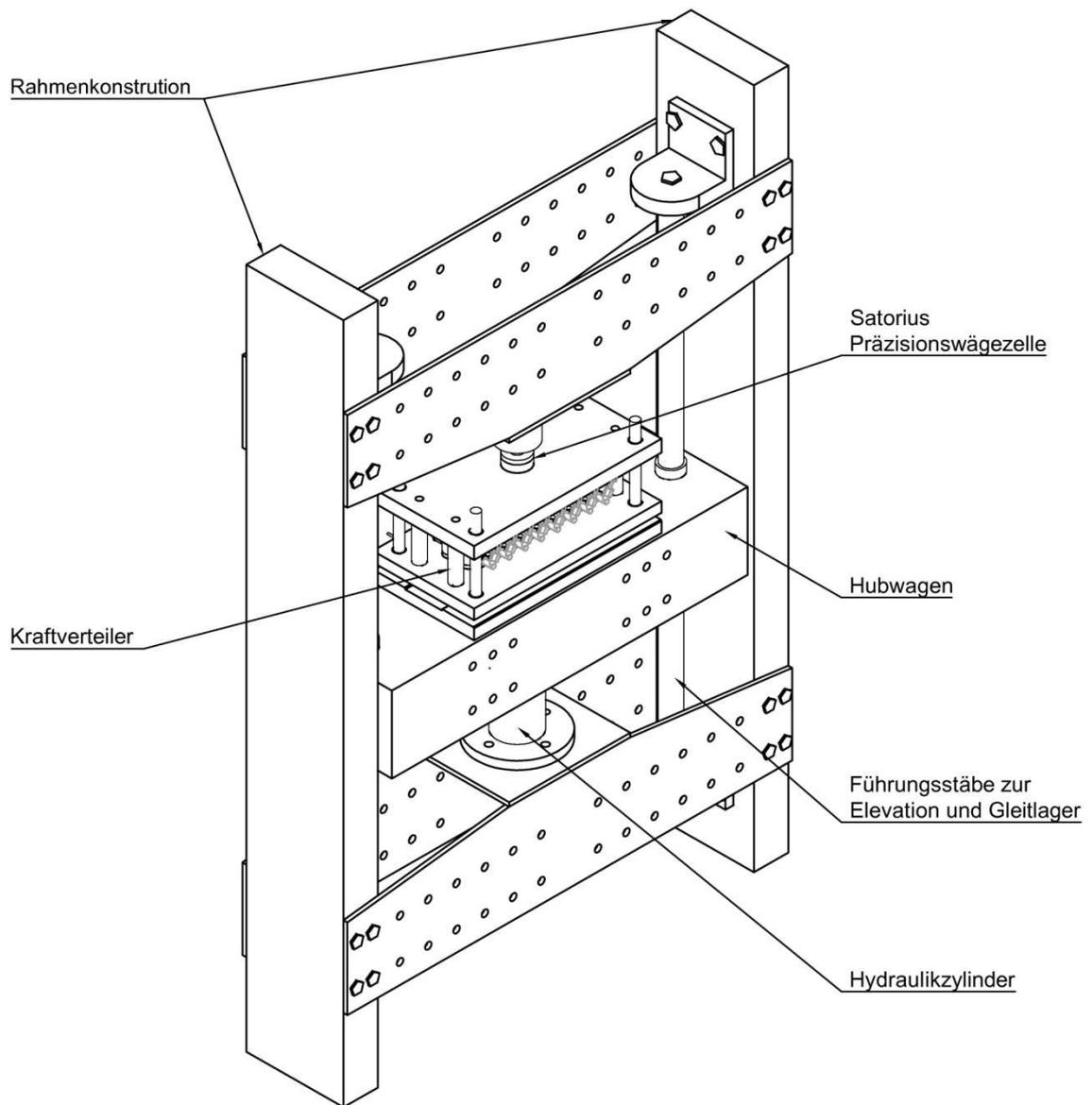


Abb. 44: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler Details (Pavlov 2010)

Die Abbildung 45 zeigt die genauen Abmessungen der Rahmenkonstruktion und des Kraftverteilers.

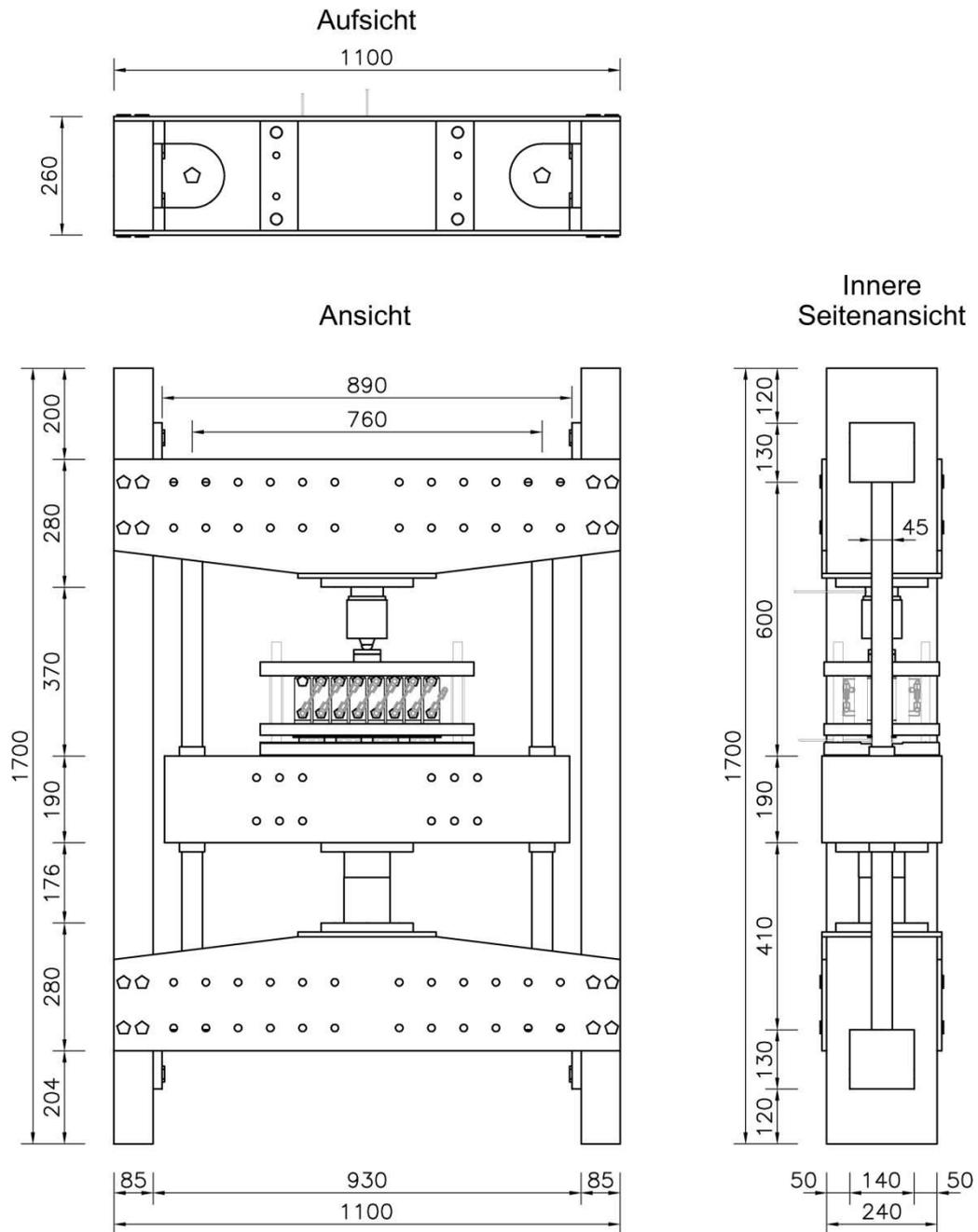


Abb. 45: Rahmenkonstruktion und Kraftverteiler Abmessungen (Pavlov 2010)

4.5 Hydraulik

Der hydraulische Teil der Prüfvorrichtung besteht aus Kompaktaggregat, Handpumpe, Hydraulikzylinder der Presse und des Kraftverteilers, Ventilen und Schläuchen.

4.5.1 Funktionsplan

Die Schaltfunktionen sind auf Abb.46 dargestellt. Im hydraulischen Teil sind zwei Steuerkreise für jeweils einfachwirkende Zylinder ausgeführt: Druckkissensteuerung und Presszylindersteuerung.

Zwei Sitzventile (Pos.2.1+2.2 sowie Pos.3.1+3.2) steuern die 16 Stück Zylinder des Druckkissens und den Zylinder für die Presse. Entlastung der Zylinder durch Ventil (Pos.2.1 bzw. 3.1) Belastung durch die Ventile (Pos.2.2 bzw. 3.2).

Die Steuerung der Zylindergruppen sollte nicht gleichzeitig erfolgen, damit eindeutige Bewegungsabläufe sichergestellt sind.

Mit dem Druckbegrenzungsventil (Pos.5) kann der Pressdruck feinfühlig während des Pressvorganges variiert werden. Der maximale Arbeitsdruck ist am Hauptdruckventil des Kompaktaggregates eingestellt bzw. kann vom Betreiber dort eingestellt werden.

Wird höherer Druck benötigt, als die Elektropumpe zulässt (170 bar), kann alternativ mit der Handpumpe gearbeitet werden. Dazu muss der 3-Weghahn (Pos.4) auf die Handpumpenstellung umgeschaltet werden. Die Handpumpe besitzt ein Ablassventil. Damit ist der Presszylinder manuell betätigbar, wie das der ursprünglichen Funktion der Werkstattpresse entspricht.

Die Geschwindigkeit des Presszylinders ist mit dem Bypass-Drosselventil (Pos.6) reduzierbar. Es ist zu beachten, dass der Durchfluss druckabhängig ist. Das bedeutet höhere Abdosierung bei höherem Arbeitsdruck und umgekehrt. Beim Entlasten des Hydraulikzylinders muss der Kugelhahn (Pos 8) geöffnet werden, weil das Rückschlagventil (Pos.7) den Rückstrom verhindert.

Die 16 Stück Druckkissenzyylinder sind kommunizierend verbunden und geben daher bei gleichem Druck gleiche Kräfte an der Kolbenstange ab. Die Kräfte können sich etwas unterschiedlich ergeben, weil die Reibkräfte innerhalb der Kissenzyylinder nicht zu 100% gleich sind.

- Position 1:** Kompaktaggregat BC-20 , ,Tank 10 dm³,Saugfilter, Kupplung ND5 ,
- Position 1.1:** Zahnradpumpe 2ccm/U.Pumpenleistung 2,8 i/min.
- Position 1.2:** Elektromotor 1,1 kW /1430. Einphasenmotor 230 VAC mit Kondensator
- Position V1:** Sitzventil NO, EVPO.T19.09.000, Magnetspule 130489 (207 VCD-RAC)
- Position 2.1:** Sitzventil NC (DD), EVH06-C5-F-00-00, Spule M16-220RA-20W-DN
- Position 2.2:** Sitzventil NC (DD), EVH06-C5-F-00-00, Spule M16-220RA-20W-DN
- Position 3.1:** Sitzventil NC (DD), EVH06-C5-F-00-00, Spule M16-220RA-20W-DN
- Position 3.2:** Sitzventil NC (DD), EVH06-C5-F-00-00, Spule M16-220RA-20W-DN
- Position 4:** Umschalhahn, KH3KS-08L, L-Funktion, Anschluss 8L
- Position 5:** Druckbegrenzungsventil, CP20/38, mit Handradbetätigung
- Position 6:** Nadel-Drosselventil NDV 06 – R 1/8“
- Position 7:** Rückschlagventil RV 08 L
- Position 8:** Kugelhahn KHS 08 L/NW 06

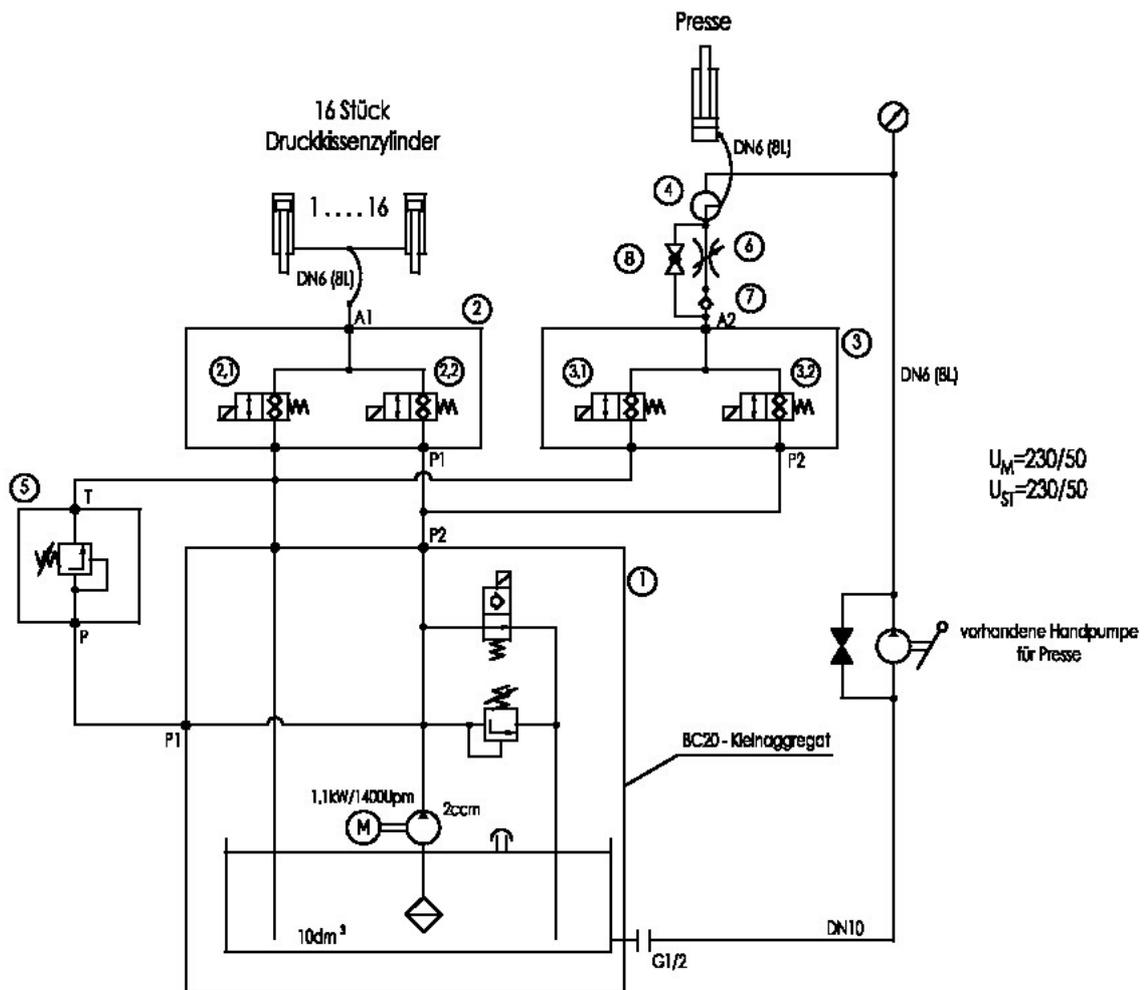


Abb. 46: Funktionsschaltplan

4.5.2 Kompaktaggregat und Hydraulikhandpumpe

Kompaktaggregat

Das Kompaktaggregat BC-20 wurde von der Fa. Hydro-Cardan [7] geliefert.

Technische Daten:

- Pumpenleistung von 3 l/min
- Betriebsdruck bis 200 bar.
- Tankgröße 10 dm³.
- Betriebsspannung Motor: 230 VAC/Einphasenmotor 1,1 kW
- Steuerspannung Magnetventile: 230 VAC (Stecker mit Gleichrichter integriert).
- Saugfilter, Kupplung ND5, Zahnradpumpe 2ccm/U.



Abb. 47: Kompaktaggregat BC – 20

Handpumpe

Es wird eine Yale-Handpumpe HPS – 2/2A [8] eingesetzt. Die Handpumpe ist einfach zu bedienen, energieunabhängig und für einen max. Betriebsdruck von 700 bar ausgelegt, sodass jeder angeschlossene Hydraulikzylinder seine maximale Kraft erreicht.

Technische Daten:

- max. Betriebsdruck 700 bar
- zweistufig mit Eilgang, automatische Umschaltung
- Tankvolumen 2l
- feinfühlig regulierbares Ablassventil
- solide Ganz-Metall-Konstruktion
- Manometer Fa.Yale

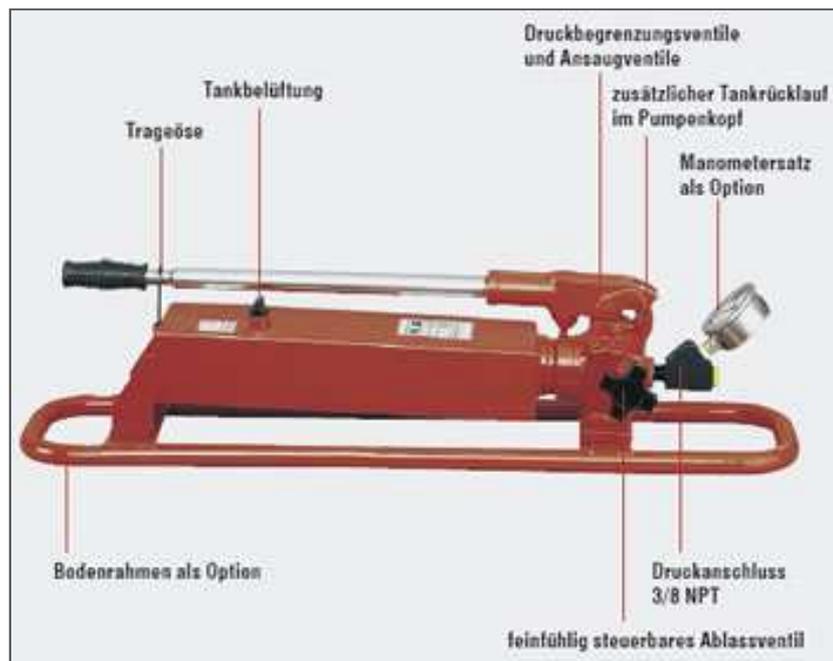


Abb. 48: Yale Handpumpe

4.5.3 Hydraulikzylinder und Ventile

Hydraulikzylinder Presse .

Verwendet wird ein einfachwirkender Stahlzylinder mit Federrückzug von der Firma Lukas [9], Typ LSC 30/60. 700 bar. Er bewegt den Hubwagen an der Rahmenkonstruktion.



Abb. 49: Hydraulikzylinder Lukas

Der Lukas LSC Zylinder besteht aus hochfestem Stahl und ist für härteste Einsätze geeignet. Die einbrennlackierten Oberflächen bieten optimalen Korrosionsschutz.

Vorteile: voll belastbare Hubbegrenzung, hartverchromte Kolben schützen vor Reifenbildung und Korrosion, Abstreifringe gegen Verschmutzung und Verschleiß des Zylinders, Außengewinde zur einfacheren Montage, international übliches Anschlusskupplungssystem, serienmäßig Befestigungsbohrungen im Zylinderboden.

Technische Daten:

- Typ LSC 30/60
- Hubkraft 309 kN
- Hub 60 mm
- Kolbenfläche 44,1 cm²
- Ölbedarf 0,27 l

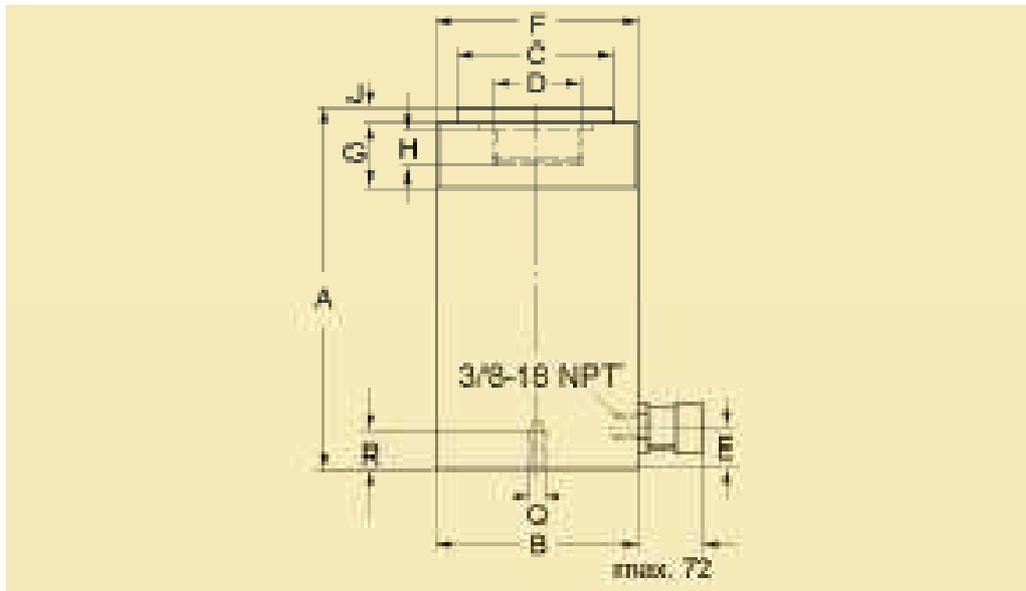


Abb. 50: Hydraulikzylinder Abmessungen

Tab.3 Hydraulikzylinder Presse Abmessungen

A	B	C	D	E	F	G	H	J	Masse
mm	Ømm	Ømm		mm		mm	mm	mm	kg
169	100	60	1½"-16	30	¾"-16	48	25	10	9,3

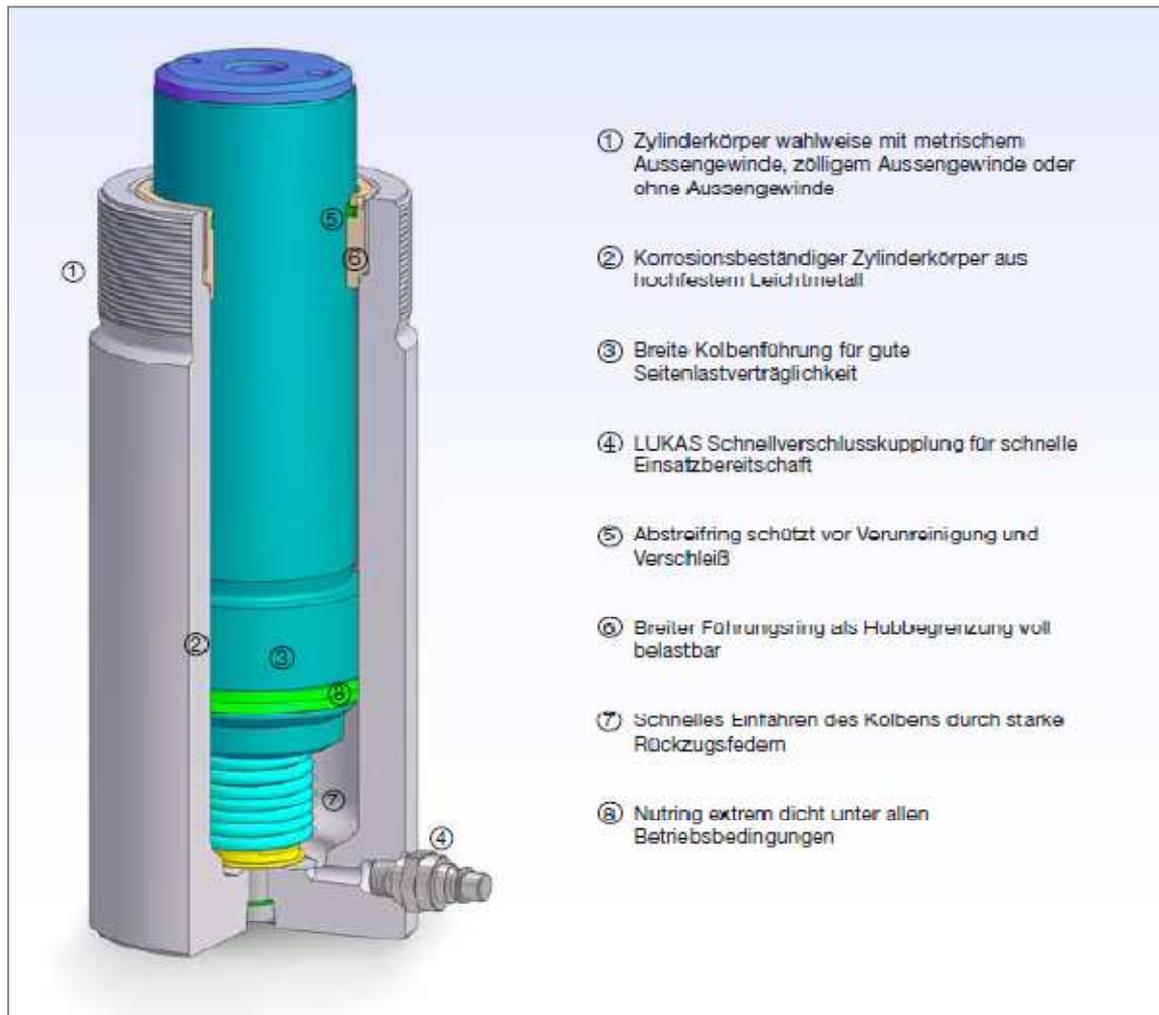


Abb. 51: Hydraulikzylinder Lukas Details

Hydraulikzylinder Kraftverteiler

Für den Kraftverteiler wurden 16 Hydraulikzylinder mit folgenden Voraussetzungen benötigt: maximaler Außendurchmesser 40 mm, maximale Länge 190 mm, Druck 200 bar, eine aktive Bewegungsrichtung (einfachwirkender Zylinder), geringe Reibungskräfte.

Da das Angebot an einfachwirkenden Zylindern mit den von uns benötigten Voraussetzungen sehr eingeschränkt war, fiel die Wahl auf einen doppelwirkenden Standardzylinder Typ CO – 25/16 – 50 der Firma Hydro-Cardan [7]. Dieser Zylinder mit einem Außendurchmesser von 35 mm wurde auf Einfachwirkung umgebaut (siehe Kap. 4.9 Probleme und Lösungen).



Abb. 52: Hydraulikzylinder Fa. Hydro-Cardan

Die Standardzylinder stellen eine einfache, schnelle und kostengünstige Variante zur Verwendung von Hydraulikzylindern dar und finden unter anderem Verwendung in Landmaschinen, Kommunalfahrzeugen und zur Betätigung von Baumaschinen.

Technische Daten:

- Betriebsdruck max. 200 bar
- Kolbengeschwindigkeit max. 25 m/min
- Betriebsmedium Hydrauliköl
- Werkstoff Kolbenstange Ck 45
- Chromschicht Kolbenstange 25 μm
- Werkstoff Zylinderrohr St 52
- Kolbendichtung Kompaktdichtung
- Führungsdichtung Nutring
- Temperaturbereich -25 bis 80 °

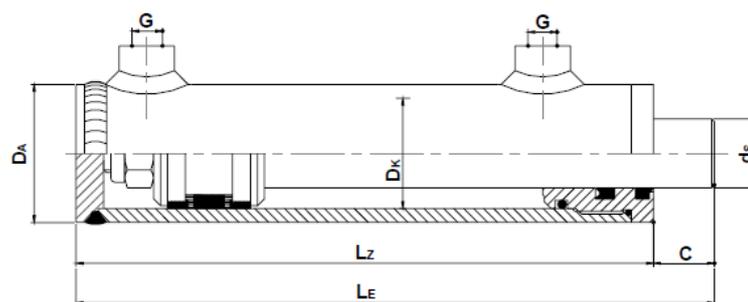


Abb. 53: Hydraulikzylinder Abmessungen

Tab.4: Hydraulikzylinder Kraftverteiler Abmessungen

D_K/d_S	Hub[mm]	D_A [mm]	L_E [mm]	L_Z [mm]	C [mm]	G
25/16	50	35	135	118	17	1/4"

Sitzventile

Die magnetbetätigten Wegeventile werden hauptsächlich für Start, Stopp und Richtungsänderung der Flüssigkeit in hydraulischen Systemen eingesetzt.

Verwendet werden zwei 2-Wege-Magnetventile mit zwei Schaltstellungen Typ EVH 06 der Firma Comatrol [10], die bereits von der Firma Hydro-Cardan an das Kompaktaggregat angeschlossen wurden.



Abb. 54: 2-Wege-Magnetventil

Technische Daten:

- max. Volumenstrom 50 l/min
- max. Druck 250 bar
- Gewicht komplett mit Spule 0,43 kg
- Dichtungen aus Viton

Druckbegrenzungsventil

Druckbegrenzungsventile dienen in hydraulischen Systemen der Begrenzung des maximalen Betriebsdruckes. Damit werden sowohl die Pumpe als auch nachgeschaltete Komponenten vor zu hohen Drücken geschützt. Die Einstellung erfolgt mittels Handrad. Die Abb. 55 zeigt das von der Firma Hydro-Cardan gelieferte Druckbegrenzungsventil des Herstellers HYDAC [11].



Abb. 55: Druckbegrenzungsventil mit Manometer

Technische Daten:

- Typ C 20/38 Fa. HYDAC
- max. Druck 350 bar
- max. Durchfluss 20 l/min
- Werkstoff Stahl, Aluminium
- Handradbetätigung
- Manometer Fa. HYDAC PN 500 bar

Drosselventil

Das Drosselventil ermöglicht einen geregelten Ölstrom in beiden Richtungen. Es wird im Hydrauliksystem zur Steuerung der Geschwindigkeit der Presse verwendet.



Abb. 56: Nadeldrosselventil NDV 06-R 1/8"

Technische Daten:

- Typ NDV 06-R 1/8" Firma Hydro-Cardan 7]
- max. Durchfluss 40 l/min
- max. Druck 280 bar
- Abmessungen: A=62 mm, B=64 mm, D=32 mm

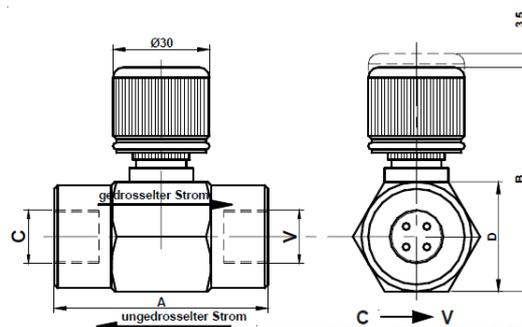


Abb. 57: Nadeldrosselventil Abmessungen

Rückschlagventil

Ein Rückschlagventil dient zur Richtungsbestimmung der Strömung eines Fluids innerhalb einer Rohrleitung und ist in der Fluidtechnik ein Wegeventil, das den Durchgang des Mediums (Hydraulikflüssigkeit, Druckluft) in einer Strömungsrichtung selbsttätig sperrt.

Technische Daten:

- Typ RV 08 L Firma Hydro-Cardan [7]
- Material Stahl
- Druck 250 bar



Abb. 58: Rückschlagventil RV 08 L

Kugelhahn

Kugelhähne dienen zum Absperrn eines Druckmittelstroms in beiden Richtungen. Wird beim entlasten des Hydraulikzylinders der Presse geöffnet.

Technische Daten:

- Kugelhahn Typ KHB 08 L/NW 06 Firma HYDAC [11]
- max. Druck 500 bar
- Umgebungstemperatur -10° bis +80°C
- Volumenstromrichtung beliebig



Abb. 59: Kugelhahn

Dreiwegehahn

Mit dem Dreiwegehahn erfolgt die Umschaltung zwischen Handpumpe und Kompaktaggregat.



Abb. 60: Dreiwegehahn

Technische Daten:

- Typ KHB3K 08LR L, Firma HYDAC [11]
- Nenndruck bis 500 bar
- Umgebungstemperatur -10°C bis +80 °C

Schläuche

In der Anlage werden Hydraulikschläuche der Firmen Manuli [12], Pix Performer [13] und Parker [14] verwendet, die für einen maximalen Druck von 225 bar bzw. 400 bar (Verbindung von Handpumpe zum Hydraulikzylinder Presse) geeignet sind.



Abb. 61: Hydraulikschlauch

4.6 Elektrik

Die Prüfvorrichtung wird elektrisch betrieben.

4.6.1 Elektromotor

Der Elektromotor betreibt das Kompaktaggregat.

Technische Daten: Betriebsspannung Motor: 230 VAC / Einphasenmotor 1,1 kW 1430 U/min Nennzahl, luftgekühlt mit Betriebskondensator. Steuerungsspannung Magnetventile: 230 VAC (Stecker mit Gleichrichter integriert).

4.6.2 Steuerkasten

Am Steuerkasten (Abb. 62) wird das Kompaktaggregat über den Netzschalter EIN/AUS betrieben. Über den Schalter PRESSE SPANNEN/ENTLASTEN (Abb.62) werden der Hydraulikzylinder und über den Schalter KISSEN SPANNEN/ENTLASTEN (Abb.62) die 16 Hydraulikzylinder des Kraftverteilers gesteuert. Eine Betriebsspannung von 230 V – 50 Hz muss am Steuerkasten vorhanden sein. Der Steuerkasten ist mit einem Notschalter ausgerüstet.

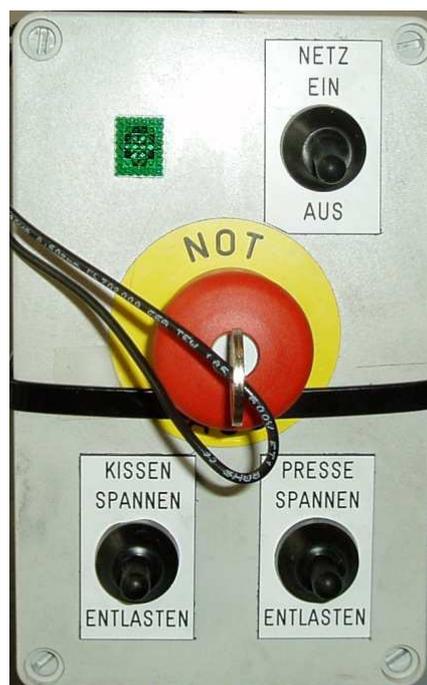


Abb. 62: Steuerkasten

Auf der Abb. 63 und 64 finden sich die elektrischen Schaltpläne des Steuerkastens.

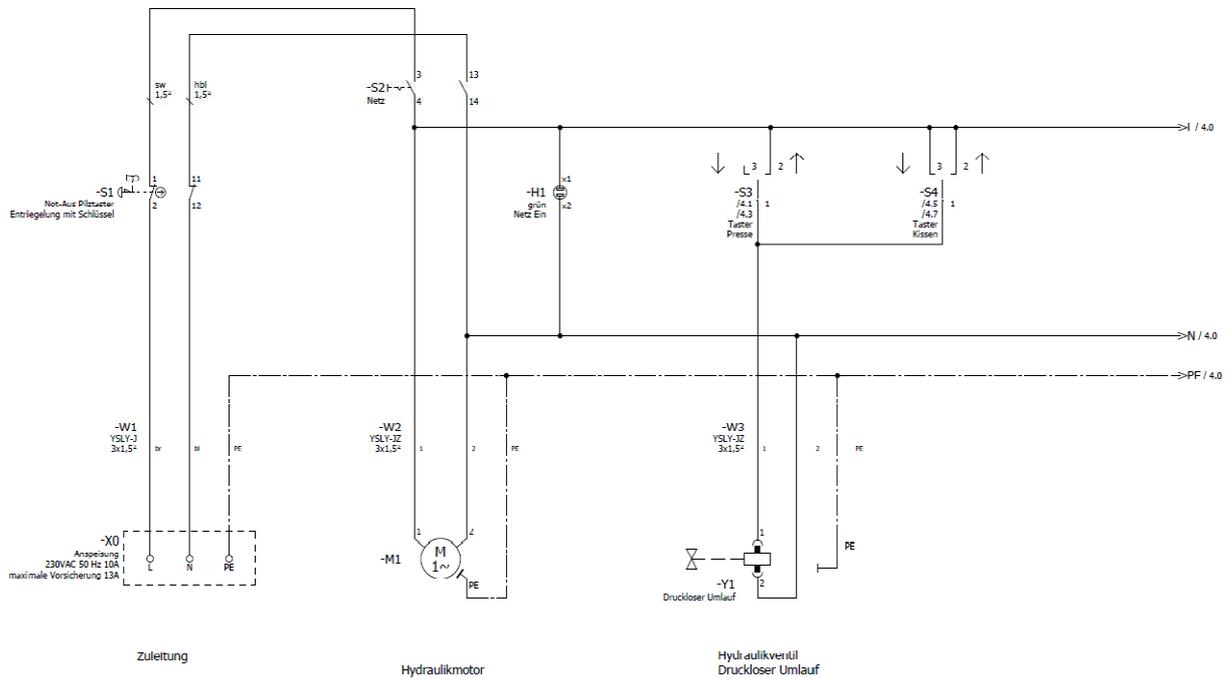


Abb. 63: Steuerung Hydraulik, Hydraulikmotor, druckloser Umlauf

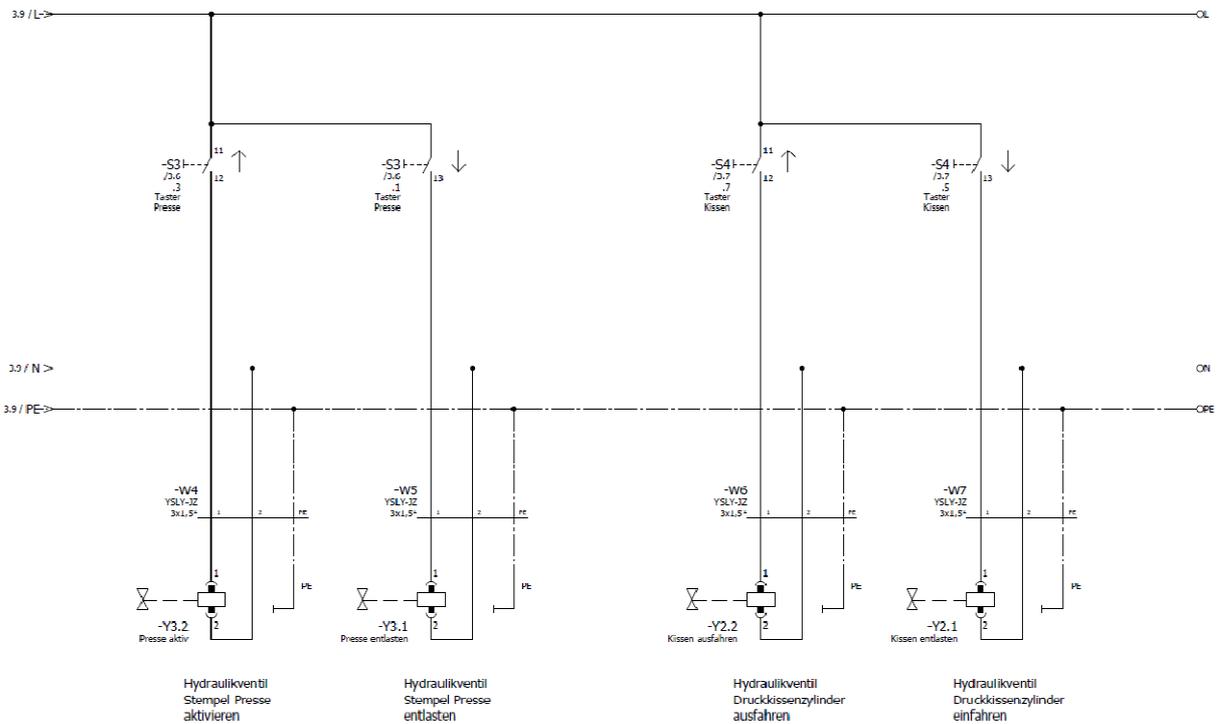


Abb. 64: Steuerung Hydraulik, Ansteuerung Ventile

4.6.3 Stromversorgung

Die Anlage wird mit Niederspannung von 230 V AC, 50 Hz betrieben.

4.7 Messtechnik

4.7.1 Messwertverarbeitung

In der Abb. 65 wird das Prinzip der Messwertverarbeitung dargestellt. Der ROC Matrix-Sensor, der sich im Kraftverteiler befindet, liefert über den CAN/Ethernet Converter Messwerte an den PC. Auf der anderen Seite liefert die Sartorius-Wägezelle exakte Werte, die am Waagenindikator und über den RS 232/Ethernet Converter am PC in Kilogramm ablesbar sind. Mithilfe einer von der Firma ROC entwickelten Software wird der Zusammenhang zwischen den vom Matrix-Sensor ausgegebenen Werten und den von der Sartorius Wägezelle festgelegten Werte ermittelt (Kalibrierung).

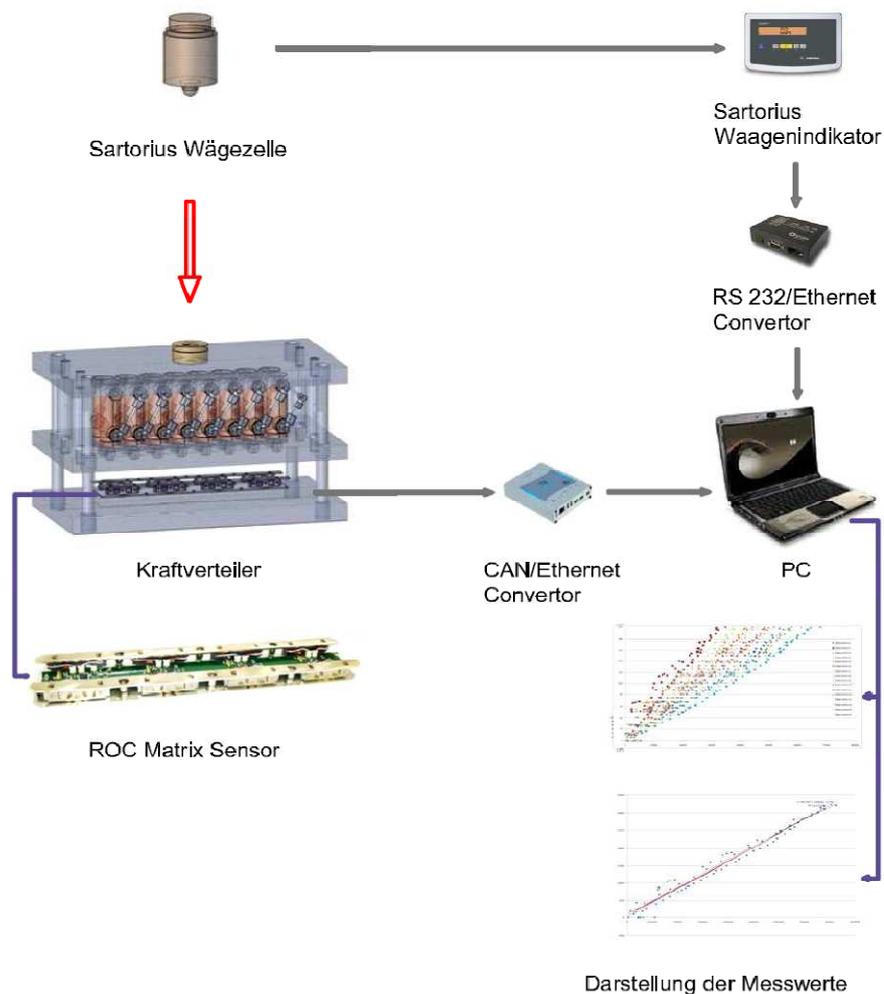


Abb. 65: Messwertverarbeitung

4.7.2 Präzisions-Drucklast-Wägezelle

Verwendet wird eine Präzisions-Wägezelle der Firma Sartorius [15] Typ PR 6201 mit einer Nennlast von 500 kg bis 50 t.



Abb. 66: Sartorius Präzisions-Drucklast-Wägezelle PR 6201

Die Wägezellen der Baureihe PR 6201 sind speziell für die Verwiegung von Silos, Tanks und Prozessbehältern konzipiert. Ihr einzigartiges Konstruktionsprinzip ermöglicht es in Verbindung mit den FlexLock-Einbausätzen Bewegungen, die durch mechanische oder thermische Kontraktion oder Expansion des Behälters bzw. der Auflagerkonstruktion entstehen, auszugleichen. Besonderes Konstruktionsmerkmal ist die über zwei Lastdekaden gleichbleibende Bauhöhe und Bauform bei gleichzeitig besonders hohem Überlastbereich von bis zu 200%. Dabei zeichnet sich diese Baureihe neben der hohen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit vor allem durch eine unerreichte Zuverlässigkeit, Robustheit und Stabilität aus, die einen jahrelangen störungsfreien Betrieb ohne jegliche Nachjustage ermöglicht. Das Pendelstützenprinzip sorgt in Verbindung mit der patentierten Messelementgeometrie für eine stets optimale Krafteinleitung in den Sensor und minimiert so den Einfluss auf die Messgenauigkeit bei gleichzeitig besonders großem Überlastbereich, sehr hoher Reproduzierbarkeit und perfekter Linearität. Durch eine spezielle Dehnungsmessstreifentechnik ergibt sich ein besonders weiter Arbeitstemperaturbereich und die hermetisch dichte Kapselung, in Verbindung mit dem Spezialkabel aus TPE, erlaubt den Einsatz auch unter extremen Betriebsbedingungen im rauen Produktionsumfeld. Eine Vorjustage der gesamten Messkette kann ohne Referenzgewicht durchgeführt werden. Durch die „Matched Output“-Technologie ist es möglich eine beschädigte Wägezelle auszutauschen, ohne dass eine neue Kalibrierung notwendig wird. Dies spart enorm Zeit bei der Inbetriebnahme [15].

Technische Daten:

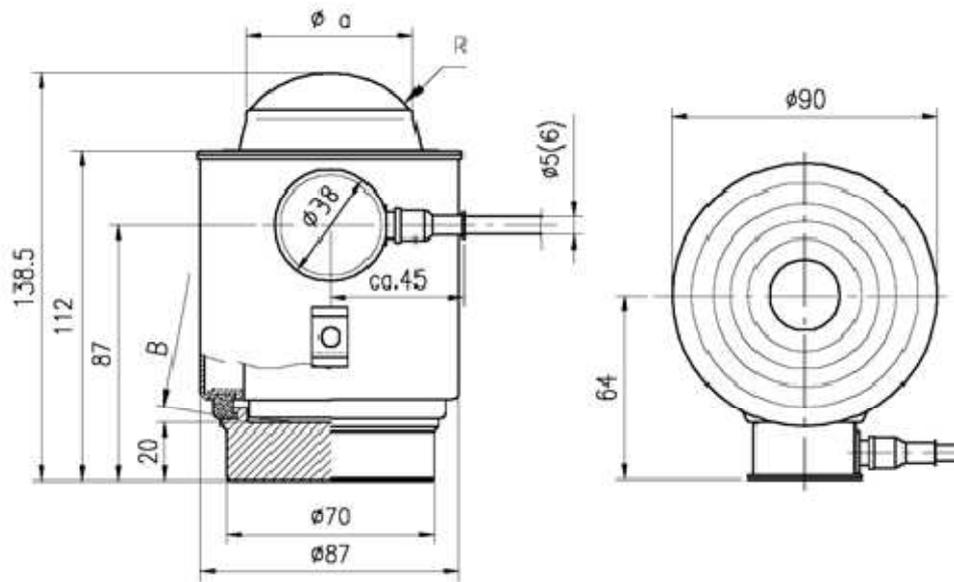


Abb. 67: Abmessungen Sartorius Wägezelle

- Rückstellkraft: Bei einer Auslenkung der Wägezelle aus der Vertikalen wird je Millimeter Auslenkung (gemessen am Wägezellenkopf) eine horizontal wirkende Rückstellkraft von 0,65% bei bis zu 10t und 1,55% ab 20t Nennlast der vertikal auf der Wägezelle ruhenden Last wirksam.
- Gehäusekonstruktion: Tiefziehgehäuse mit Membrandeckel und Messelement hermetisch verschweißt, mit Schutzgas gefüllt.
- Schutzart: IP68, IEC 529 (entspricht NEMA 6). Die Wägezelle kann in 1,5m Wassertiefe für 10.000 Stunden eingetaucht werden.
- Kabel: Robust, flexibel, geschirmt TPE thermoplastisches Elastomer Mantelfarbe: grau für PR 6201/..E: blau Durchmesser: 5mm, Leitung 4 x 0,35mm²
- Biegeradius: Feste Verlegung $\geq 50\text{mm}$, flexible Verlegung $\geq 150\text{mm}$
- Konformitätsbescheinigung: Geltungsbereich PR 6201/..E, Kennzeichnung II 1 G EEx ia IIC T6, II 1D IP65 T 85°C, Zul.-Nummer PTB 02 AT EX 2059, TÜV 03 ATEX 2301X
- Fehlerklasse 0,015 % E_{\max}
- Mindestvorlast untere Grenze des spezifizierten Messbereichs $E_{\min} 0 \% E_{\max}$
- Mindestteilungswert kleinster Teilungswert der Wägezelle, $v_{\min} = E_{\max}/Y \quad Y \quad 14.000$
- Nennkennwert relatives Ausgangssignal bei Nennlast $C_n \quad 1 \text{ mV/V}$ für $E_{\max} = 50\text{t}$ $C_n \quad 2 \text{ mV/V}$
- Relative Kennwertabweichung zulässige Abweichung vom Nennkennwert $d_c < 0,07 \% C_n$
- Nullsignal Ausgangssignal im unbelasteten Zustand $S_{\min} 4\text{mA} < 1,0 \% C_n$
- Reproduzierbarkeit max. Messsignaländerung bei wiederholten Belastungen $\epsilon R < 0,005 \% C_n$

- Belastungskriechen max. Ausgangssignaländerung bei E_{max} während 30 Min. $dcr < 0,015 \% C_n$
- Linearitätsabweichung Abweichung von der besten Geraden durch Null $dLin < 0,01 \% C_n$
- Relative Umkehrspanne max. Differenz zwischen Auf- und Abwärtskennlinie: $dhy < 0,015 \% C_n$
- (TK) des Mindestvorlastsignals TK max. Änderung von S_{min} pro 10K im BT $TKS_{min} < 0,01 \% C_n/10K$
- TK des Kennwerts max. Änderung von C pro 10K im BT $TKc < 0,01 \% C_n/10K$
- Eingangswiderstand zwischen den Speiseanschlüssen $RLC 650 \pm 6 \text{ } \Omega$
- Ausgangswiderstand zwischen den Messanschlüssen $RO 610 \pm 0,5 \text{ } \Omega$
- Isolationswiderstand zwischen Innenschaltung und Gehäuse, 100VDC $RIS > 5.000 M\Omega$
- Isolationsfestigkeit zwischen Schaltung und Gehäuse (nur Ex-Version) 500 VDC
- Nennversorgungs- unter Einhaltung der technischen Daten $Bu 4... 24 \text{ V Spannung}$
- Max. Speisespannung Dauerbetrieb ohne Schaden $U_{max} 32 \text{ V}$
- Nennumgebungstemperatur unter Einhaltung der technischen Daten BT $-10... +55 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Gebrauchstemperatur Dauerbetrieb ohne Schaden $BTu -40... +95 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Lagerungstemperatur ohne elektrische und mechanische Beanspruchung $BTI -40... +95 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Grenzexzentrizität zulässiger Abstand von der Messachse $S_{ex} 10 \text{ mm}$
- Vibrationsbeständigkeit Beständigkeit gegen Schwingungen 20g, 100h, (IEC 68-2-6 Fc) 10... 150Hz
- Umgebungsdruckeinfluss Luftdruckeinfluss auf das Mindestvorlastsignal S_{min} PKS_{min} bis 2t 250 g/kPa 3t , bis 10t 320 g/kPa , ab 20t 420 g/kPa
- Nennmessweg max. elastische Verformung bei Nennlast s_{nom} bis 30t $< 0,5 \text{ mm}$, bis 50t $< 0,8 \text{ mm}$

4.7.3 Waagenindikator

Eingesetzt wird ein Waagenindikator der Firma Sartorius [15] Typ Combics CISL1.



Abb. 68: Combics CISL1-Waagenindikator

Combics 1 ist ein robustes Auswertegerät für die anspruchsvolle, tägliche Qualitätskontrolle. Es erfüllt höchste Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Wäageergebnisse. Combics Auswertegeräte sind:

- robust und langlebig (Gehäuse ausEdelstahl)
- leicht zu reinigen und zu desinfizieren
- leicht zu bedienen durch große, hinterleuchtete Anzeigeelemente, große Tasten mit deutlich spürbarem Druckpunkt
- unabhängig vom „Arbeitsplatz“ der Plattform einsetzbar
- flexibel verwendbar durch unterschiedliche Schnittstellen
- sicher vor unbefugtem Ändern der Betriebsparameter durch Codewort-Schutz

Technische Daten:

- Anzeige 20mm LCD, 7-Segment für Wägedaten, hinterleuchtet
- Kurzhubtasten mit akustischer Quittung
- Integrierter A/D-Wandler, zum Anschluss analoger Plattformen der Baureihe Combics, IU, IF, sowie von Wägezellen
- Datenschnittstelle RS232, D-SUB 25 pol. standardmäßig
- Anschluss für Akkubetrieb
- Optional: 2. Schnittstelle RS232, RS485, RS422, 0-20mA, Profibus
- Maximale Ablesbarkeit 31250 Anzeigeschritte
- Anzahl der Eichwerte (als Ein- oder Mehrbereichswaage, Mehrteilungswaage) $\leq 3000e$, $2 \times 3000e$ nach EN 45501
- Wägezellenanschluss: Speisespannung 9 V, verfügbare Sensortechnik 4 oder 6 Leiter-technik
- Brückenimpedanz 83 Ohm bis 2000 Ohm

- Messsignal 0,45 mV bis 36 mV
- Messsignal für Totlast 0,45 mV bis 6,3 mV
- Messsignalhub 4,5 mV bis 29,7 mV
- Messsignal/Eichwert 0,72 $\mu\text{V}/\text{e1}$ bis 4,75 $\mu\text{V}/\text{e1}$
- Empfindlichkeit max. 4 Mio. Schritte (intern)
- Digitale rückwirkungsfreie Schnittstelle gemäß EN45501
- Datenschnittstelle: bidirektionale RS232 mit Steuereingang, serienmäßig eingebaut
- Weitere Datenschnittstelle optional
- Gehäuse: Material Edelstahl 1.4301, Schutzklasse gemäß 60529 IP44 (optional IP65)
- Temperaturbereich -10°C bis $+40^{\circ}\text{C}$
- Netzversorgung 100-240 VAC ($-15/+10\%$), 50-60 Hz, max.17W/23VA
- DC Versorgung optional 15,5 -24 VDC ($\pm 10\%$), max.12 W
- AC Versorgung optional 13 – 17 VAC ($\pm 10\%$), 50-60 Hz, max.12W
- Akkubetrieb optional über externes Akkupack
- Leistungsdaten des integrierten A/D-Wandlers: Wägebereich bis 32 t
- Netzkabellänge 3 m
- Nettogewicht (ca.) 2,3 kg

4.8 Probleme und Lösungen bei der Entwicklung und Inbetriebnahme des Prüfsystems

Im Zuge der Entwicklung und Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung traten verschiedene Probleme auf, für die eine entsprechende Lösung gefunden werden musste.

Nach der Entscheidung für den Kraftverteiler 16 miteinander kommunizierende Hydraulikzylinder zu verwenden, mussten im Handel passende Zylinder gefunden werden. Die an sie gestellten Anforderungen konnten am optimalsten durch einfachwirkende Zylinder erfüllt werden (geringste Reibungskräfte, eine aktive Bewegungsrichtung). Da das Angebot an einfachwirkenden Zylindern mit den benötigten Voraussetzungen sehr eingeschränkt war, fiel die Wahl auf einen doppelwirkenden Standardzylinder Typ CO – 25/16 – 50 der Firma Hydro-Cardan [7]. Dieser Zylinder mit einem Außendurchmesser von 35 mm und einer Länge (ohne Hub) von 135 mm wurde auf Einfachwirkung umgebaut. Das war im Vergleich mit dem eingeschränkten Angebot an größtmäßig passenden einfachwirkenden Zylindern die ökonomisch günstigere Variante.

Außerdem musste das Problem der Fixierung der 16 Hydraulikzylinder des Kraftverteilers im 4 x 4 Raster gelöst werden. Nach verschiedenen Überlegungen, unter anderem die Zylinder zu schweißen oder zusammenzuschrauben, fiel die Entscheidung auf die Konstruktion mit drei Aluminium-Platten – die kostengünstigste und am schnellsten zu realisierende Option.

Nach Anschluss des Hydrauliksystems an den Hydraulikzylinder der Presse durch die Firma Hydro-Cardan wurde festgestellt, dass dessen Geschwindigkeit nicht reduzierbar war und der Druck nicht konstant blieb. Damit waren genaue Messungen mit dem Kompaktaggregat unmöglich. Es musste eine Lösung gefunden werden, wie einerseits mit dem Kompaktaggregat die Presse langsamer gefahren und andererseits ein Druckverlust vermieden werden konnte. Das Problem wurde letztendlich durch zusätzlichen Einbau des Drosselventils, Kugelhahnes und Rückschlagventils zufriedenstellend behoben.

5 Steuerung des Prüfstandes und Testmessungen

5.1 Steuerung des Prüfstandes

Das Kompaktaggregat wird am Steuerkasten (Abb. 69) über den Netzschalter EIN/AUS betrieben. Der Motorstart darf nur bei nichtbetätigten Steuerschaltern erfolgen (lastloser Anlauf). Über den Schalter PRESSE SPANNEN/ENTLASTEN (Abb. 69) werden der Hydraulikzylinder und über den Schalter KISSEN SPANNEN/ENTLASTEN (Abb. 69) die 16 Hydraulikzylinder des Kraftverteilers gesteuert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Dreiwegehahn (Abb. 70) auf die Position Kompaktaggregat gestellt ist. Mit dem Druckbegrenzungsventil (Abb. 70) kann der Pressdruck begrenzt und während des Pressvorganges feinfühlig variiert werden. Die Geschwindigkeit des Hydraulikzylinders ist mit dem Nadel-Drosselventil (Abb. 70) reduzierbar. Beim Entlasten des Hydraulikzylinders (Abb. 69 Presseschalter ENTLASTEN) muss der Kugelhahn (Abb. 70) geöffnet werden. Wird ein höherer Druck benötigt, als das Kompaktaggregat zulässt (170 bar) wird mit der Handpumpe gearbeitet. Dazu muss der Dreiwegehahn (Abb. 70) auf die Position Handpumpe umgestellt werden. Die ausgeübte Druckkraft wird am Waagenindikator abgelesen. Es ist darauf zu achten, dass die Ölfüllung im Tank mindestens 90% (Luftstopfen mit Mess-Stab) beträgt. Eine Betriebsspannung von 230 V – 50 Hz muss am Steuerkasten vorhanden sein. Der Steuerkasten ist mit einem Notschalter ausgerüstet (Abb. 69).

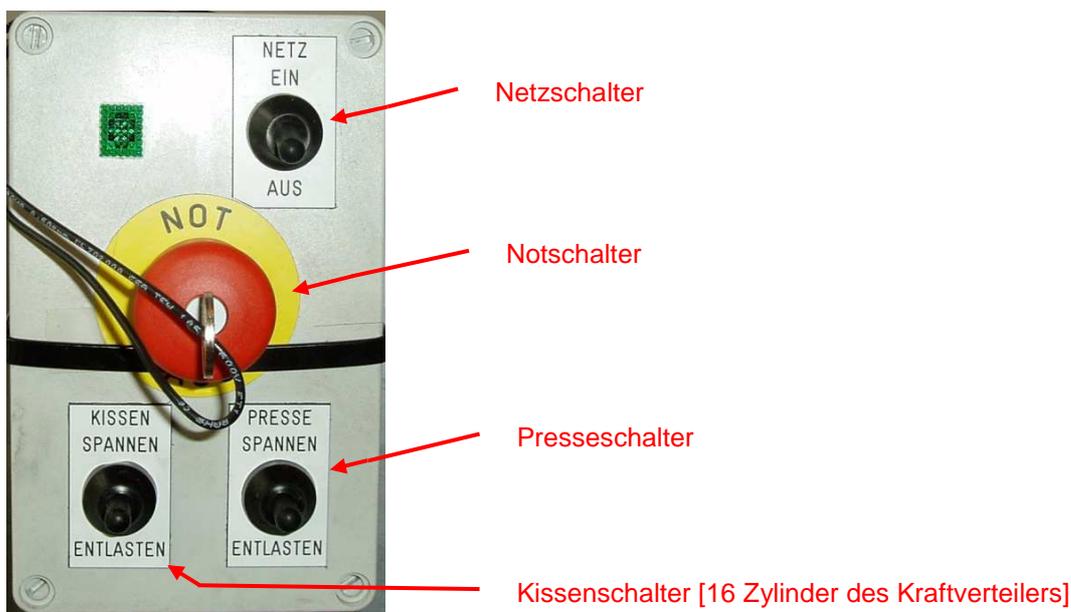


Abb. 69: Steuerkasten

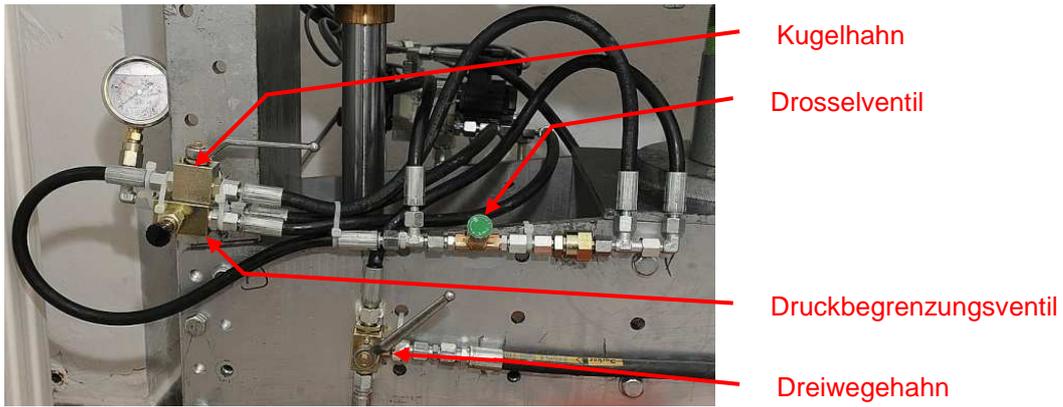


Abb. 70: Steuersystem

5.2 Testmessungen

5.2.1 Kalibriermessungen des WIM Sensors am Prüfstand

Der WIM Sensor wird nur statisch kalibriert. Der spezielle Aufbau des Sensors (Mechanik, Elektronik, Software) ermöglicht automatisch die dynamische Eichfähigkeit, besonders durch die hohe Messgeschwindigkeit. Jeder Messpunkt (DMS) liefert zirka 5000 Werte pro Sekunde. Das ergibt bei 16 Messpunkten pro Sensormodul zirka 80.000 Werte pro Sekunde.

Zur Kalibrierung befindet sich der WIM Sensor im Kraftverteiler. Auf jeden einzelnen der 16 Messpunkte des Sensors (zwei Reihen zu je acht Messpunkten) wirkt 1/16 der gesamten Druckkraft, die durch die Presse ausgeübt wird.

Im ersten Schritt wird geprüft, ob alle 16 Messpunkte des Matrix-Sensors im funktionsfähigen Zustand sind und ein Signal liefern. Die Abb. 71 stellt dar, dass von jedem einzelnen Messpunkt ein Signal empfangen wird. Die blauen Balken bilden die erste Reihe und die roten Balken die zweite Reihe mit je 8 Messpunkten ab. Die grüne Linie entspricht der Sartorius Wägezelle. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liefern die einzelnen Messpunkte vor der Kalibrierung ohne Druckausübung unterschiedliche Werte und die Sartorius-Wägezelle zeigt Null.

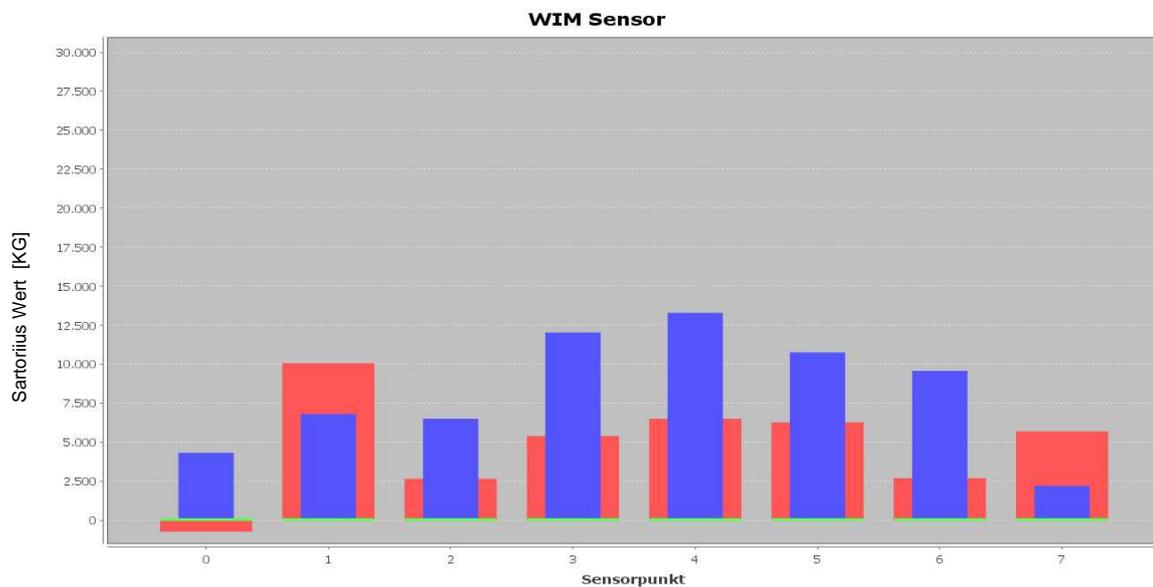


Abb. 71: Sensor-Messwerte vor Kalibrierung

Im nächsten Schritt erfolgt die Kalibrierung. Jeder der 16 Messpunkte des WIM Sensors liefert bei Druckbelastung über den CAN/Ethernet Converter Messwerte an den PC (Tab. 5 Datenreihe (DR) 1 bis 16). Gleichzeitig liefert die Sartorius-Wägezelle bei Druckbelas-

tung exakte Werte in Kilogramm, die am Waagenindikator und über den RS 232/Ethernet Converter am PC ablesbar sind (Tab 5 letzte Spalte Sartorius). Der Sartorius-Wert entspricht aufgrund der gleichmäßigen Verteilung 1/16 des Gesamtgewichtes und somit dem genauen Wert pro Sensor-Messpunkt.

Tab.5: Sensorwerte und Sartorius Werte

DR 1	DR 2	DR 3	DR 4	DR 5	DR 6	DR 7	DR 8	DR 9	DR 10	DR 11	DR 12	DR 13	DR 14	DR 15	DR 16	Sartorius [KG]
300	689	71	605	345	142	200	263	70	345	386	221	62	854	245	723	0
1998	671	1929	1856	1849	2145	1835	2731	2368	1849	3364	2241	842	851	574	2489	5,56
3896	2063	3994	3134	3698	4208	3809	4067	4967	3698	5781	3828	3742	2484	2310	3499	12,06
5246	2871	5550	4174	4880	5389	5074	5553	6513	4880	7242	4823	5007	3628	3206	4052	16,25
7950	4206	8494	5915	7186	7755	7713	7894	9788	7186	10449	7109	7406	5846	5164	4926	25,12
9987	5437	10665	7546	8936	9226	9904	9474	12091	8936	12853	8689	9230	7499	6631	5881	31,62
11820	6552	12636	8893	10574	10660	11794	10716	14392	10574	15495	10264	11006	9170	7986	6659	38,14
14399	7843	15590	11022	12718	12406	14578	12255	17142	12718	18635	12086	13290	11152	9686	7972	46,06
15628	8755	16387	12149	13615	13215	15104	13375	18372	13615	19934	12767	14305	11984	10410	8225	49,69
16751	8935	17416	12859	14399	13768	16433	13791	19470	14399	20970	13584	15185	12751	11007	8669	53,12
17596	9138	18211	13566	15219	14351	17985	14074	20792	15219	22567	14568	16209	13518	11515	8981	57,5
19237	9912	19958	14850	16557	15251	19396	15324	22477	16557	24410	15755	17611	14762	12974	9881	62
21127	11151	21686	16271	18317	16927	21585	17166	24536	18317	26917	17469	19549	16374	14600	11085	67,94
23059	12097	24170	18689	19764	18077	23197	17948	26927	19764	28359	18455	21256	17804	15235	11423	74,62
24795	12833	25965	19971	21414	19363	25396	19613	28819	21414	30873	20287	22882	19162	16941	12897	80,62
26796	14165	27995	21933	23207	20488	27873	21513	30779	23207	33064	22234	24547	20461	18707	14351	87,69
28613	14803	29980	23694	24692	21424	29895	22377	32768	24692	35250	23948	25968	21680	19840	15459	94,06
31074	16147	31820	25318	26683	23304	32271	24569	35017	26683	37575	26042	28063	23381	21819	17172	100,56
32474	17010	33896	27235	27772	24415	33227	24763	36883	27772	38498	26717	29469	24558	22061	17603	105,88
34334	17925	35627	28675	29528	25671	35494	26576	39017	29528	40794	29131	31212	25897	23701	19344	112,5
36530	19441	37961	30461	31236	27165	37338	27987	41180	31236	42646	30753	32996	27325	25016	20515	119,69
38159	20385	39339	32206	32853	28784	38970	29684	43213	32853	45005	32412	34733	29015	26362	21689	125
40067	21640	41337	33879	34629	30465	41076	31164	45398	34629	47104	34333	36671	30195	28000	23478	131,62
42001	23166	42983	35326	36218	31502	42945	32688	47180	36218	49045	36182	37929	31659	29413	25033	137,62
42605	23322	44384	37088	37020	32216	43592	33456	48619	37020	49517	36874	38802	32348	29918	25541	143,25
42756	23535	44407	37153	37019	32203	43579	33338	48653	37019	49642	36644	38750	32240	29856	25514	143,25
45015	25247	46528	38597	38916	33860	45576	35175	50898	38916	51817	38708	40784	34156	31235	27235	150,69
46637	26235	48139	40397	40431	35212	47230	36302	52873	40431	53752	40592	42464	35543	31971	28702	156,75
47243	26413	48952	40615	41301	35547	48744	37837	53685	41301	55131	41828	43112	36016	33218	29876	161,5
48083	27283	49759	42023	42342	36615	49116	38670	55498	42342	56252	43271	44496	37612	33177	30943	169,56
50400	29254	52699	44445	44363	38700	50835	40241	58169	44363	58281	44803	46828	39562	34677	32195	177,12
51416	29781	53512	45104	45463	39588	52770	41551	59568	45463	59755	46039	48000	40469	35566	33379	181,94
53569	31486	55501	46514	47228	40859	54158	43348	61613	47228	62174	48337	49820	41868	37070	34882	188,44
55040	32273	57257	48018	48612	42294	55645	44352	63790	48612	63403	49417	51487	43479	38086	36026	194,56
56975	33560	59174	49483	50366	43780	57258	46437	65721	50366	66097	51060	53353	45178	39711	37340	201,25

Die Abb. 72 stellt die Messdaten der Tabelle 5 als Diagramm dar. Auf der X-Achse finden sich die Messwerte der 16 Messpunkte in verschiedenen Farben (Datenreihe 1 bis 16). Auf der Y-Achse sind die Werte der Sartorius-Wägezelle in Kilogramm aufgetragen.

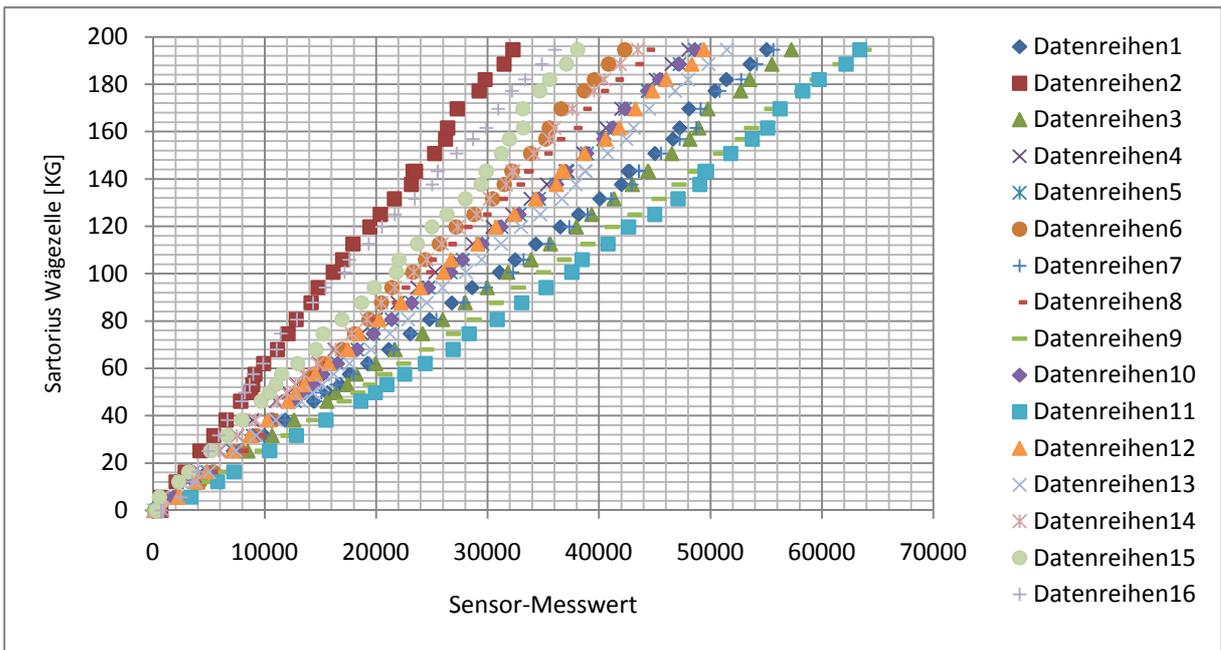


Abb. 72: Sensorwerte im Vergleich mit Sartorius Werten

Jeder Messpunkt hat einen eigenen Kalibrierfaktor. Der Kalibrierfaktor besteht aus Multiplikator (k) und Offset (d). Der Multiplikator ist die Steigung einer Geraden, die durch eine Datenreihe gelegt wird. (Abb.73).

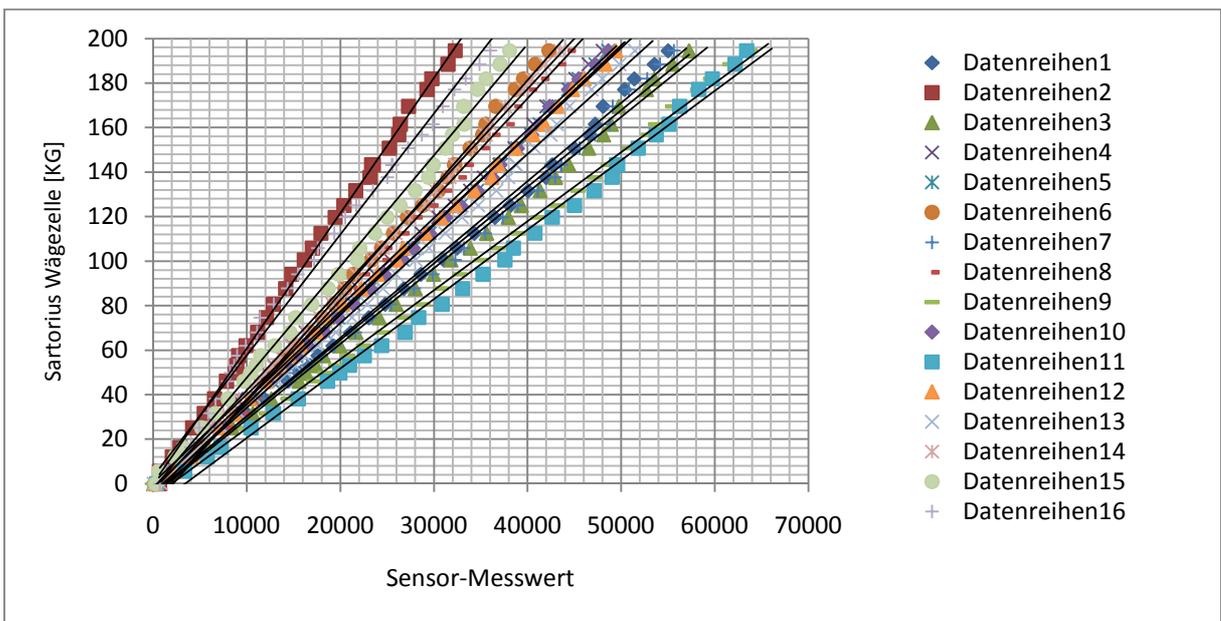


Abb. 73: Lineare Regression

Zur Umrechnung der Sensor-Messwerte in Kilogramm wird folgende Formel angewendet:

$$y = k \cdot x + d$$

y = kg-Wert des Sensor-Messpunktes

k = Multiplikator

x = Sensor-Messwert

d = Offset

Die folgende Tabelle zeigt die Umrechnung der Sensor-Messwerte in Kilogramm mit der oben angeführten Formel.

Tab.6: Umrechnung Sensor-Messwerte in Kilowerte

	Datenreihen 1	Datenreihen 2	Datenreihen 3	Datenreihen 4	Datenreihen 5	Datenreihen 6	Datenreihen 7	Datenreihen 8	Datenreihen 9	Datenreihen 10	Datenreihen 11	Datenreihen 12	Datenreihen 13	Datenreihen 14	Datenreihen 15	Datenreihen 16	Sartorius [KG]
Steigung	0,0034	0,0058	0,0033	0,0039	0,0039	0,0045	0,0034	0,0043	0,0030	0,0039	0,0030	0,0038	0,0037	0,0044	0,0048	0,0050	
Offset	4,22	12,53	1,21	5,30	3,75	2,91	3,29	2,89	-1,43	3,75	-2,64	5,61	4,65	5,15	7,97	17,61	
	5,26	16,54	1,45	7,69	5,11	3,56	3,97	4,04	-1,22	5,11	-1,47	6,46	4,88	8,92	9,16	21,28	0,00
	11,14	16,43	7,68	12,62	11,04	12,73	9,54	14,76	5,82	11,04	7,60	14,24	7,77	8,90	10,75	30,25	5,56
	17,71	24,52	14,61	17,67	18,34	22,17	16,27	20,57	13,79	18,34	14,97	20,35	18,53	16,10	19,18	35,37	12,06
	22,39	29,21	19,83	21,77	23,00	27,58	20,58	27,02	18,52	23,00	19,42	24,18	23,23	21,14	23,53	38,18	16,25
	31,75	36,97	29,70	28,64	32,09	38,41	29,57	37,20	28,56	32,09	29,19	32,99	32,13	30,92	33,04	42,62	25,12
	38,81	44,12	36,98	35,08	38,99	45,14	37,03	44,06	35,61	38,99	36,51	39,07	38,90	38,20	40,17	47,47	31,62
	45,16	50,60	43,59	40,39	45,45	51,71	43,47	49,46	42,66	45,45	44,56	45,14	45,48	45,56	46,75	51,42	38,14
	54,09	58,11	53,50	48,79	53,90	59,70	52,96	56,15	51,09	53,90	54,13	52,15	53,96	54,30	55,00	58,08	46,06
	58,35	63,40	56,17	53,24	57,44	63,40	54,75	61,02	54,85	57,44	58,09	54,78	57,72	57,97	58,52	59,36	49,69
	62,24	64,45	59,62	56,04	60,53	65,93	59,28	62,82	58,22	60,53	61,24	57,92	60,99	61,35	61,41	61,62	53,12
	65,16	65,63	62,29	58,83	63,76	68,60	64,56	64,05	62,27	63,76	66,11	61,71	64,79	64,73	63,88	63,20	57,50
	70,85	70,13	68,15	63,90	69,04	72,72	69,37	69,49	67,43	69,04	71,72	66,28	69,99	70,21	70,97	67,77	62,00
	77,39	77,33	73,94	69,50	75,98	80,39	76,83	77,49	73,74	75,98	79,36	72,89	77,18	77,31	78,86	73,88	67,94
	84,08	82,82	82,27	79,04	81,69	85,66	82,32	80,89	81,06	81,69	83,75	76,68	83,51	83,61	81,95	75,60	74,62
	90,10	87,10	88,29	84,10	88,19	91,55	89,81	88,12	86,86	88,19	91,41	83,74	89,55	89,60	90,23	83,08	80,62
	97,03	94,84	95,10	91,84	95,26	96,70	98,25	96,38	92,86	95,26	98,09	91,24	95,72	95,32	98,81	90,46	87,69
	103,32	98,55	101,76	98,79	101,12	100,98	105,14	100,13	98,96	101,12	104,75	97,84	101,00	100,70	104,31	96,09	94,06
	111,84	106,36	107,93	105,20	108,97	109,59	113,23	109,66	105,85	108,97	111,83	105,90	108,77	108,19	113,92	104,78	100,56
	116,69	111,37	114,89	112,76	113,26	114,67	116,49	110,50	111,57	113,26	114,64	108,50	113,98	113,38	115,09	106,97	105,88
	123,13	116,69	120,70	118,45	120,19	120,42	124,22	118,38	118,10	120,19	121,64	117,80	120,45	119,28	123,06	115,81	112,50
	130,74	125,50	128,53	125,49	126,92	127,26	130,50	124,51	124,73	126,92	127,28	124,05	127,07	125,57	129,44	121,75	119,69
	136,38	130,98	133,15	132,38	133,30	134,67	136,06	131,89	130,96	133,30	134,47	130,44	133,52	133,02	135,98	127,71	125,00
	142,99	138,28	139,85	138,98	140,30	142,37	143,23	138,32	137,65	140,30	140,86	137,84	140,71	138,22	143,93	136,79	131,62
	149,69	147,14	145,37	144,69	146,57	147,12	149,60	144,94	143,11	146,57	146,78	144,96	145,37	144,67	150,79	144,68	137,62
	151,78	148,05	150,07	151,64	149,73	150,38	151,81	148,28	147,52	149,73	148,21	147,62	148,61	147,71	153,25	147,26	143,25
	152,30	149,29	150,15	151,90	149,72	150,32	151,76	147,77	147,62	149,72	148,59	146,74	148,42	147,23	152,94	147,13	143,25
	160,13	159,23	157,26	157,60	157,20	157,91	158,56	155,75	154,50	157,20	155,22	154,69	155,97	155,68	159,64	155,86	150,69
	165,74	164,98	162,66	164,70	163,18	164,10	164,20	160,65	160,55	163,18	161,12	161,94	162,20	161,79	163,22	163,31	156,75
	167,84	166,01	165,39	165,56	166,61	165,63	169,36	167,32	163,04	166,61	165,32	166,70	164,60	163,87	169,27	169,27	161,50
	170,75	171,07	168,10	171,11	170,71	170,52	170,63	170,94	168,59	170,71	168,73	172,26	169,74	170,91	169,07	174,68	169,56
	178,78	182,52	177,96	180,67	178,68	180,07	176,48	177,77	176,78	178,68	174,91	178,16	178,39	179,50	176,36	181,04	177,12
	182,30	185,58	180,68	183,27	183,02	184,13	183,07	183,46	181,06	183,02	179,40	182,92	182,74	183,50	180,67	187,05	181,94
	189,75	195,49	187,35	188,84	189,98	189,95	187,80	191,27	187,33	189,98	186,77	191,77	189,49	189,66	187,98	194,68	188,44
	194,85	200,06	193,24	194,77	195,44	196,52	192,87	195,63	194,00	195,44	190,52	195,93	195,67	196,76	192,91	200,49	194,56
	201,55	207,54	199,67	200,55	202,35	203,32	198,37	204,69	199,91	202,35	198,73	202,26	202,60	204,25	200,80	207,16	201,25

Die Abb.74 zeigt auf der Y-Achse die Werte der Sartorius-Wägezelle in kg und auf der X-Achse die Summe aller 16 Messpunkte des Sensors. Dabei entsprechen die blauen Punkte der Summe aller 16 Sensor-Rohwerte gegen den Sartorius Wert, die roten Punkte der Summe der in Kilogramm umgerechneten Sensorwerte gegen den Sartorius Wert.

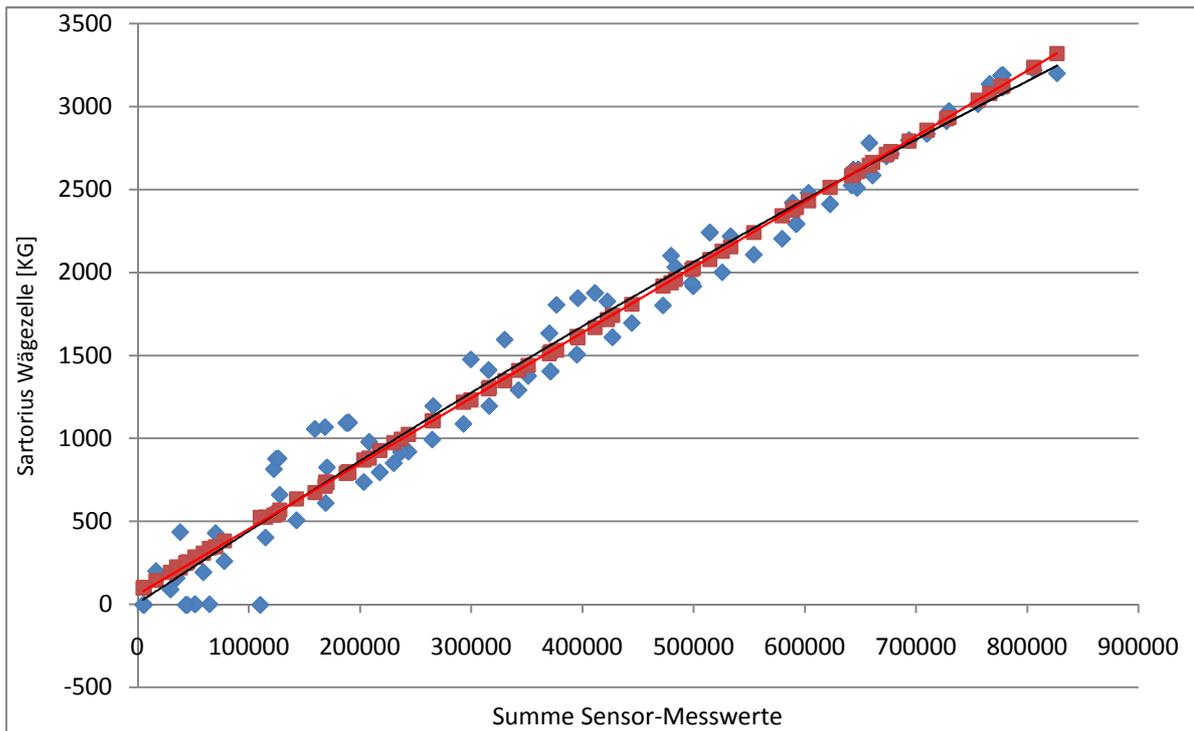


Abb. 74: Summe der 16 Messwerte

Nach erfolgter Kalibrierung zeigen die Live-Bilder auf Abb. 75 und 76 die Gewichtsverteilung bei 100 und 200 kg/Sensor. Die grüne Linie entspricht dem Sartorius-Wert. Die blauen Balken bilden die erste Reihe und die roten Balken die zweite Reihe mit je 8 Messpunkten ab. Im Vergleich zur Abb.70 ist ersichtlich, dass jeder der 16 Messpunkte nun ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

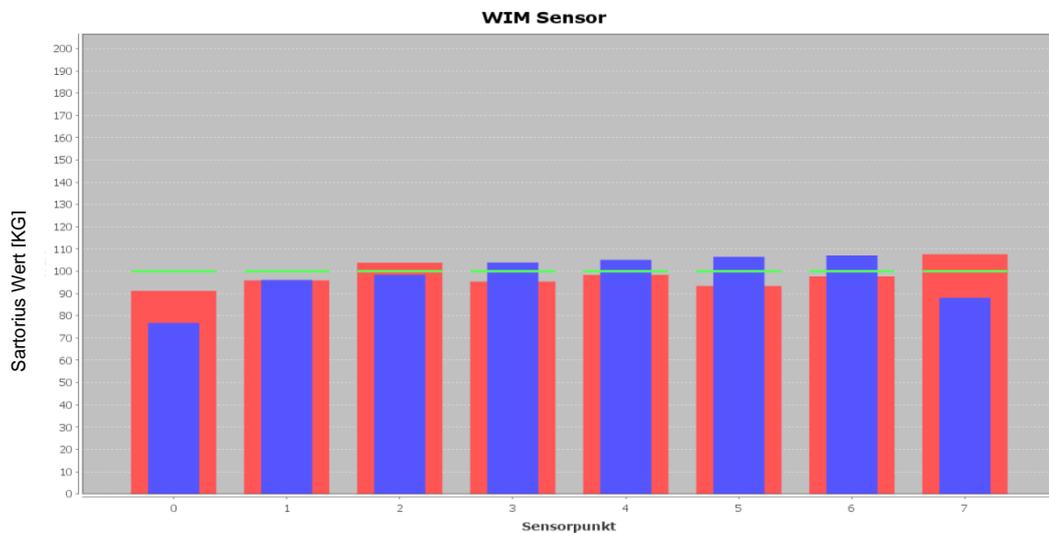


Abb. 75: Sensor-Messwerte nach der Kalibrierung bei 100 kg/Messpunkt

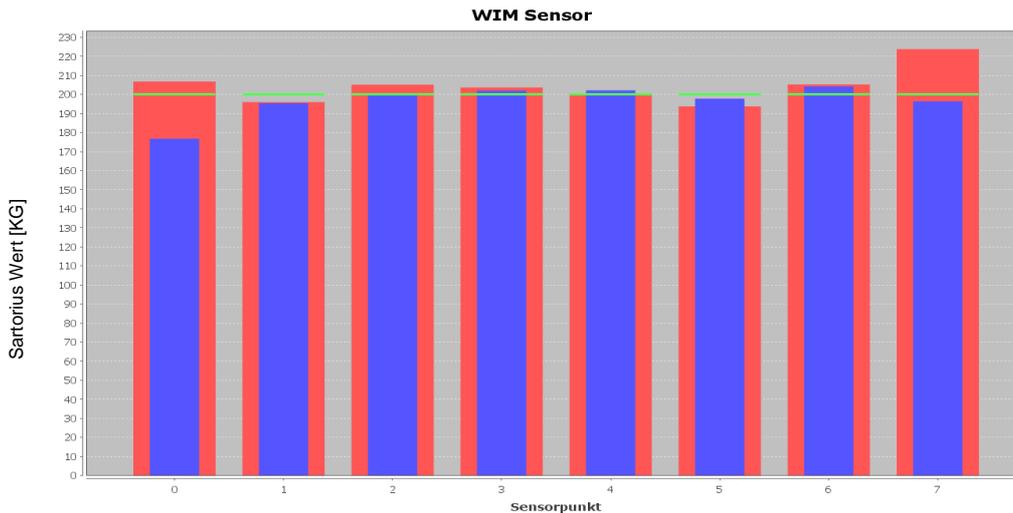


Abb. 76: Sensor-Messwerte nach der Kalibrierung bei 200 kg/Messpunkt

Nach der Kalibrierung wurden Messungen durchgeführt, um die Sensorwerte in Kilogramm mit den Sartorius-Werten zu vergleichen und um das Verhalten des Matrix-Sensors bei langsamer Druckerhöhung und -entlastung mit Hilfe der Presse zu testen. Abb. 77 stellt den Kurvenverlauf der einzelnen Messpunkte in verschiedenen Farben dar (Datenreihen 1 - 16). Die X-Achse zeigt die Messwerte des Matrix-Sensors in Kilogramm und die Y-Achse die an der Presse eingestellten Werte (Sartorius-Wägezelle). Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, stimmen die Messergebnisse der Sartorius-Wägezelle und des Matrix-Sensors überein und bilden einen sehr zufriedenstellenden, homogenen Kurvenverlauf. Nur nach vollständiger Druckentlastung zeigt sich, dass die Werte des Sensors nicht ganz auf Null zurückgehen. Das ist im Vergleich zum gesamten Druckverlauf von geringer Bedeutung. Die Hauptursache liegt in der Software, deren Entwicklung noch im Prozess ist, und in der nicht vollständigen Materialentlastung.

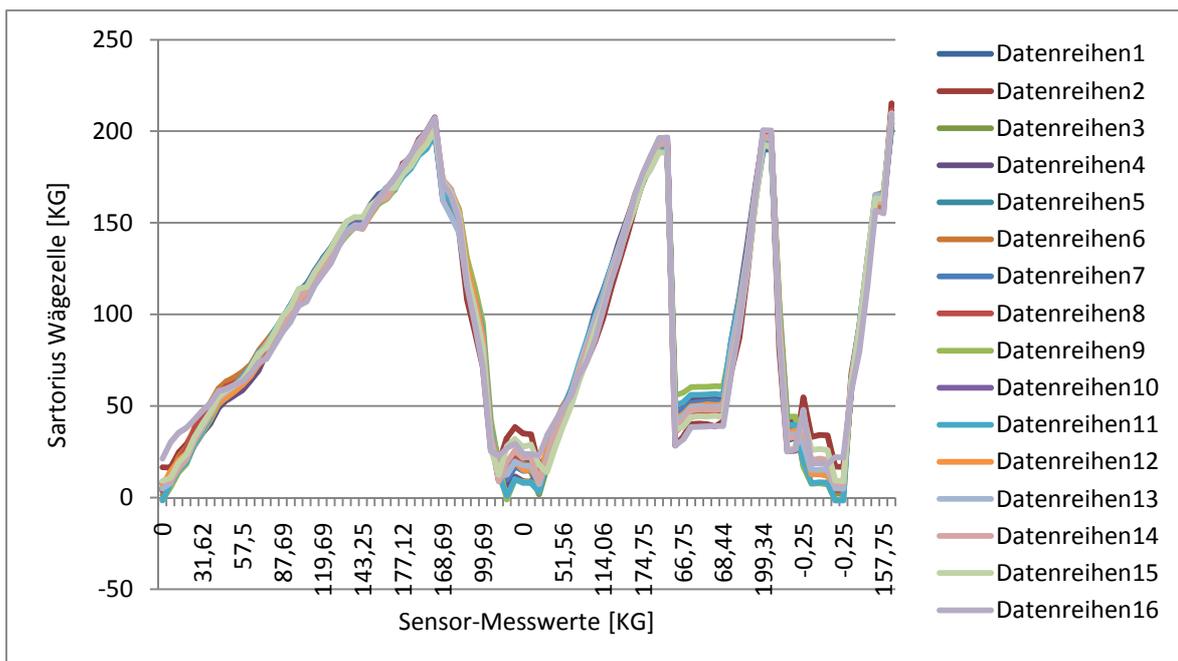


Abb. 77: Druckabhängiger Kurvenverlauf der Sensor-Messwerte

5.2.2 Testmessungen in der Strasse

Im Rahmen des Projektes ASSET Road (www.project-asset.com) [2] werden in Zusammenarbeit mit Straßenbetreibern und Polizeibehörden vier Testanlagen in EU-Ländern geplant, entwickelt und erprobt. Auf den Versuchsstrecken werden neben high-speed und low-speed WIM auch weitere Techniken wie z.B. Fahrzeugidentifikation und Fahrerunterstützungssysteme integriert und als System getestet.

Der ROC WIM-Sensor soll künftig in vollautomatischen Wiegesystemen eingesetzt werden. Die Abbildung 78 zeigt den schematischen Aufbau einer WIM-Wiegestation. Der Einbau des Sensors in zwei Reihen ermöglicht das exakte Messen der Fahrzeuggeschwindigkeiten und liefert genauere Messergebnisse von Rad-, Achs- und Gesamtgewichten von Straßenfahrzeugen während der Fahrt. Der WIM-Sensor ermöglicht somit zukünftig die automatische Überlastermittlung und automatische Ahndung von Überladungen. Darüber hinaus soll eine solche Testanlage eine Verkehrssicherheitssektion mit Feststellung des technischen Zustandes (z.B. Bremsen) durch thermische Überwachung, Kontrolle der Geschwindigkeit, Kontrolle des Fahrzeugabstandes und KFZ-Kennzeichenerkennung bilden. Ganze Straßensektionen werden kontinuierlich per Video überwacht, das Verhalten der Fahrer analysiert und Verkehrsübertretungen mittels innovativer und kombinierter Systeme geahndet werden können.

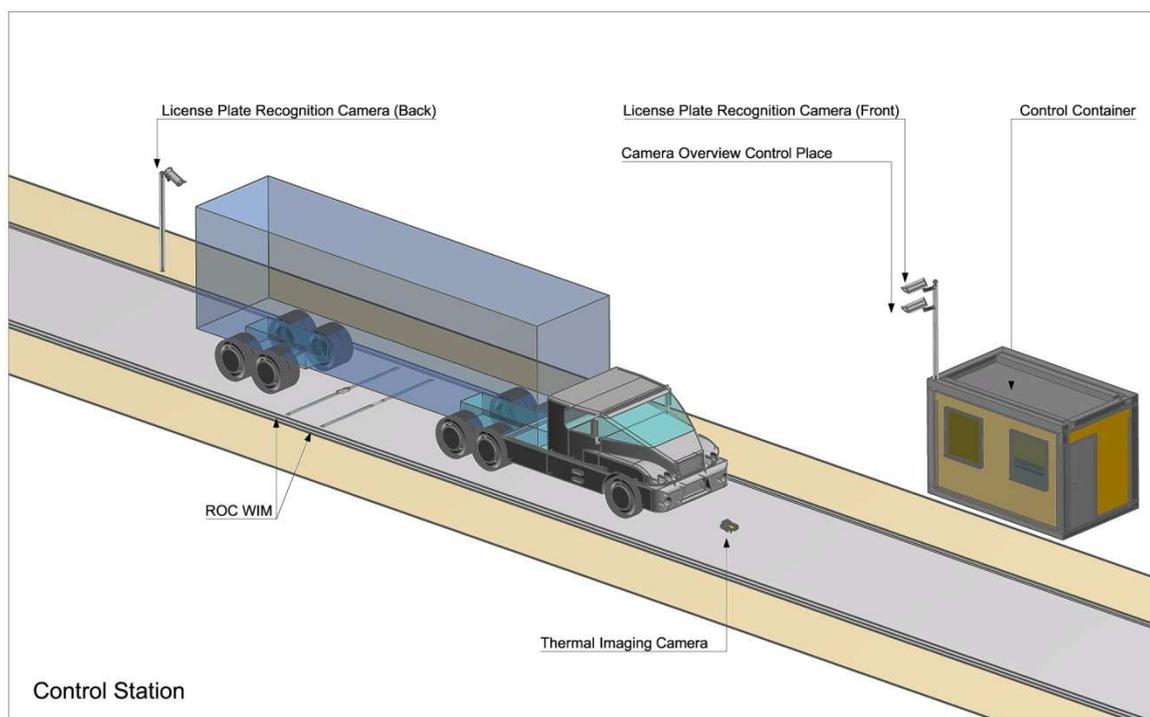


Abb. 78: WIM Wiegestation

Der WIM-Sensor muss sehr sorgfältig in den Einbaurahmen in der Strasse installiert werden. Bei der Auswahl eines geeigneten Einbauortes ist zu berücksichtigen, dass die Straße zirka 40 m vor und 30 m hinter der Wiegeplatte eben und gleichförmig ist, die Fahrzeuge die Wiegestelle möglichst beschleunigungs- und bremsfrei überfahren können,

Spurrillen beseitigt werden und LKW beim Passieren des Messpunktes nicht auf- und abfedern.

Abb. 79 zeigt die Sensorwanne in der Strasse, in der sich fünf aneinandergereihte ROC Sensor-Module befinden.



Abb. 79: Sensorwanne mit Abdeckrahmen

In der Abb. 80 sind zwei in der Straße eingebaute Sensorreihen dargestellt. Dadurch werden exakte Messungen der Fahrzeuggeschwindigkeiten und genauere Messergebnisse von Rad-, Achs- und Gesamtgewicht möglich.



Abb. 80: Zwei WIM Sensorreihen in der Straße

Mithilfe der Wärmebildtechnik erfolgt die Überwachung des Zustandes kritischer Fahrzeugkomponenten, wie Bremsen, Lager und Reifen. Die Abbildung 81 zeigt die in der Straße eingebaute Infrarotkamera.



Abb. 81: Infrarotkamera

Die erfassten Daten werden im Kontroll-Container dargestellt und verarbeitet. (Abb.82)



Abb. 82: Datenerfassung im Kontroll-Container

Die Abb. 83 zeigt das Profil (WIM Footprint) bei der Überfahrt eines LKW-Zwillingsreifens über den WIM-Sensor. Auf der X-Achse sind die Sensor-Messpunkte abgebildet – hier die Messpunkte 6 bis 20. Die Y-Achse stellt die Zeitdauer der Überfahrt und die Z-Achse das Gewicht dar. Aus dem Diagramm sind somit die Fahrzeuggeschwindigkeit, Zeitdauer der Überfahrt, die bei der Überfahrt belasteten Sensor-Messpunkte, das Gewicht des Reifens und der aufgetretene Gewichtsbereich der Sensor-Messpunkte ablesbar.

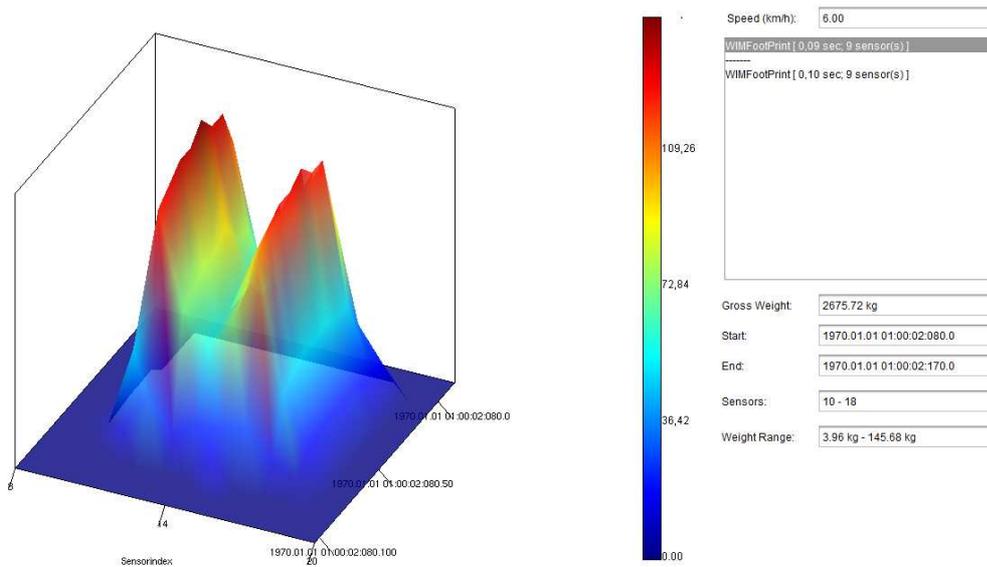


Abb. 83: WIM Footprint Zwillingreifen, Bsp. 1

Auf der Abb. 84 wird wie in Abb. 83 das Profil der Überfahrt mit einem Zwillingreifen dargestellt. Hier ist im Vergleich zur obigen Abbildung ersichtlich, dass auf den Außenreifen eine höhere Gewichtsbelastung kommt.

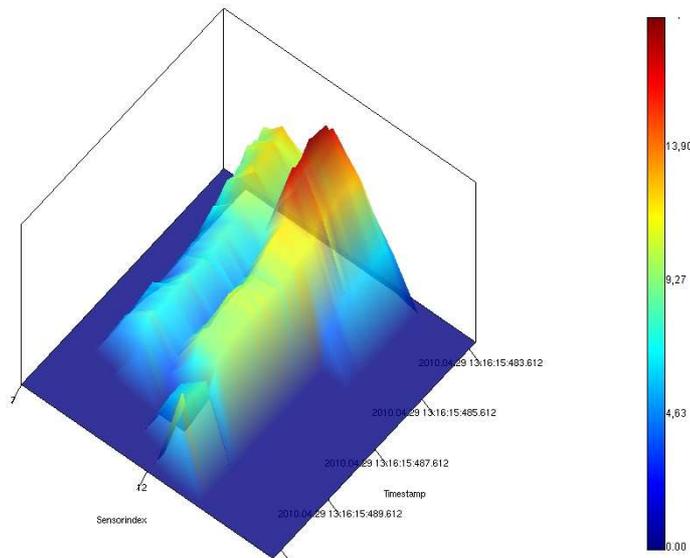


Abb. 84: WIM Footprint Zwillingreifen, Bsp. 2

Durch dieses hochgenaue WIM-Wiegesystem wird eine vollautomatische Erkennung und Ahndung von LKW-Überladungen möglich. Mittels der von der Firma ROC entwickelten Software lassen sich sämtliche Messergebnisse anschaulich darstellen. Wie die Abbildung 85 zeigt werden der Zeitpunkt der Überfahrt, der Fahrzeugtyp, die Geschwindigkeit, das Gesamtgewicht, das Achsgruppengewicht, das Einzelachsgewicht, die Überladung in Prozent und Höhe des Bußgeldes übersichtlich dargestellt.



Abb. 85: Vollautomatische Überladungskontrolle

Zusammenfassend wird die neue Generation von Wiegesystemen ermöglichen:

- die Synchronisation mit Video-Kennzeichenerkennung
- die Integration eines RFID Lesers (Technik zur Identifikation von Kennzeichen und Daten von Fahrzeugen) im WIM Sensor
- Sensor Arrays für verschiedene dynamische Genauigkeiten
- verbesserte Gewichtsdaten für die Modellierung und Erhaltung der Straßen (Erweiterung der Lebensdauer)
- neue Verkehrslastmodelle und Algorithmen (Lastfluß)
- die Synchronisation mit Infrarot-Fahrzeuginspektion (Bremsen)

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit bestand darin, in Zusammenarbeit mit der Firma ROC Systemtechnik eine spezielle Prüfvorrichtung für die exakten Prüfstandsmessungen des von ihr entwickelten neuen WIM Matrix-Sensors zu konstruieren und erste Kalibriermessungen durchzuführen.

Zum Schutz der kostenintensiven Verkehrsinfrastruktur Straße vor Oberflächenbeschädigung und Zerstörung, hervorgerufen durch überladene Achsen von Schwerlastfahrzeugen als auch für die Verbesserung der Verkehrssicherheit müssen zukünftig umfassendere Maßnahmen ergriffen werden. Hierzu wird die Technologie des dynamischen Wiegens verwendet.

Mit Hilfe von Weigh-in-Motion (WIM) Messungen können die auftretenden Gesamt- und Achslasten der die Messeinrichtungen passierenden Fahrzeuge bestimmt werden. Weigh-in-Motion Messungen haben im Vergleich zu den konventionell verwendeten statischen Wiegemethoden den Vorteil, dass die Messungen während der Fahrt stattfinden.

Allerdings zeigte sich in den vergangenen Jahren, dass die derzeit lieferbaren und eingesetzten WIM-Systeme zur dynamischen Erfassung von Fahrzeuggewichten auf Straßen die künftigen Anforderungen nach Vollautomatisierung der Gewichtskontrollen und entsprechender Ahndung nicht erfüllen. Gemäß den Erfahrungen aus dem internationalen TOP TRIAL Projekt 2001 sind Messdatenqualität, Lebensdauer der Sensoren und Sicherheit des Einbaus in der Straße zu verbessern. Vor allem zeigte sich auch, dass die Genauigkeit der WIM-Sensoren und ihre Kalibrierbeständigkeit verbessert werden mussten.

Die Firma ROC Systemtechnik beschäftigt sich aus diesen Gründen seit Jahren intensiv mit der Entwicklung einer neuen WIM-Technologie – dem sogenannten Matrix-Sensor. Dabei ist die Firma ROC Partner und Hauptkoordinator in technischen Angelegenheiten des EU-Projektes ASSET Road (Advanced Safety and Driver Support in Efficient Road Transport) [2]. Dieses Projekt umfasst den Aufbau eines holistischen, integrierten und effizienten Systems zur Verkehrssicherheit durch die Anwendung innovativer Technologien, die Automatisierung von wichtigen Prozessen und eine bessere Zusammenarbeit von Fahrer, Straßenbetreibern und Infrastruktur.

Der innovative ROC WIM-Sensor besteht aus Modulen mit Dehnungsmessstreifen in Mini-Scherkraftaufnehmern und wird statisch und voraussichtlich auch dynamisch eichfähig sein. Um das Konzept einer modular ausbaubaren Produktfamilie zu verwirklichen, wurde als Kernelement ein flaches Messmodul mit 16 Messpunkten (2 Reihen zu je 8 Messelementen) in einem 4 cm Raster konzipiert, das über CAN sowohl in Länge als auch in Breite für verschiedene Produkte und Systemanwendungen je nach Bedarf (in Genauigkeit,

Messfläche, Dynamik usw.) durch das Aneinanderreihen der Module erweitert werden kann.

Der neue WIM-Sensor zeichnet sich unter anderem durch hohe Genauigkeit, Kalibrierbeständigkeit, gute Temperaturstabilität, einfachen Einbau in der Straße, der Möglichkeit der Messung der Reifenbreite, Erkennung von Doppelreifen und Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit der Räder aus.

Aufgrund des speziellen Aufbaus des WIM Sensors mit 16 Messpunkten war es notwendig, zur Kalibrierung eine Prüfvorrichtung zu konzipieren, die die Druckkraft auf alle Messpunkte gleichmäßig verteilt. Damit soll der Matrix-Sensor exakter kalibriert und in weiterer Folge eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden können.

Der Schwerpunkt der Diplomarbeit beschreibt die Entwicklung und Realisierung des Prüfsystems in Form einer elektrohydraulischen Presse mit Neukonstruktion eines Kraftverteilers. Zur gleichmäßigen Verteilung der Druckkraft auf die 16 Messpunkte des Sensors wurden für den Kraftverteiler sechzehn Hydraulikzylinder verwendet, die miteinander kommunizierend verbunden wurden und damit eine gleichmäßige Verteilung der Druckkraft ermöglichen. Es wurden 16 Stück doppelwirkende Zylinder mit einem Außendurchmesser von 35 mm, einer Länge von 135 mm und einem Betriebsdruck von 200 bar verwendet, die auf Einzelwirkungsfunktion umgebaut wurden. Um die 16 Hydraulikzylinder stabil auf jeden Messpunkt zu positionieren, wurde eine Konstruktion mit 3 Aluminiumplatten entwickelt.

Zur detaillierten Beschreibung der gesamten Prüfvorrichtung wurde eine Unterteilung in Mechanik, Hydraulik, Elektrik und Messtechnik vorgenommen. Sämtliche Komponenten wurden in Aufbau und Funktion ausführlich beschrieben. Das System wurde so konstruiert, dass es mittels Hydraulikhandpumpe oder alternativ mit einem Kompaktaggregat betrieben werden kann und die Geschwindigkeit des Hydraulikzylinders reduzierbar ist, um genauere Messungen zu ermöglichen.

Die Grundfunktion der elektrohydraulischen Presse besteht darin, dass sie einen definierten Druck auf den ROC Matrix-Sensor ausübt, der sich zur Kalibrierung im Kraftverteiler befindet. Die auftretende Druckkraft verteilt sich anschließend auf die 16 Zylinder des Kraftverteilers, die kommunizierend verbunden sind und daher bei gleichem Druck gleiche Kräfte an der Kolbenstange abgeben. Zuletzt wird die Druckkraft an einer Sartorius-Präzisions-Wägezelle gemessen und am Waagenindikator abgelesen. Mithilfe moderner Software werden die Messergebnisse am PC dargestellt.

Anschließend wurden die Abläufe der Kalibriermessungen erläutert und anhand von Beispielen veranschaulicht. Der ROC Matrix-Sensor liefert über den CAN/Ethernet Converter Messwerte an den PC. Gleichzeitig liefert die Sartorius-Wägezelle exakte Werte, die am Waagenindikator und über den RS 232/Ethernet Converter am PC in Kilogramm ablesbar sind. Mithilfe einer von der Firma ROC entwickelten Software wird der Zusammenhang zwischen den vom Matrix-Sensor ausgegebenen Werten und den von der Sartorius Wägezelle festgelegten Werte ermittelt (Kalibrierung). Außerdem wurden nach der Kalibrierung Messungen durchgeführt, um das Verhalten des Matrix Sensors bei langsamer

Druckerhöhung und -entlastung mit Hilfe der Presse zu testen. Dabei stimmen die Messergebnisse der Sartorius-Wägezelle und des Matrix-Sensors überein und bilden einen sehr zufriedenstellenden homogenen Kurvenverlauf.

Zuletzt wurde der Aufbau einer WIM-Wiegestation beschrieben und der Ablauf von Testmessungen in der Straße erläutert.

Im nächsten Schritt sind erste Testmessungen und Auswertungen mit dem Matrix-Sensor bei einer in Graz (Elisabethstraße) neu installierten WIM-Testanlage geplant. Die daraus analysierten Daten sollen zur Optimierung vollautomatischer dynamischer Achslastwiegesysteme führen.

6.2 Ausblick

Es ist zu erwarten, dass sich die high-speed-WIM-Technologie aufgrund des Bedarfs, der vielfachen Einsatzmöglichkeiten und des Problemdrucks im Bereich des Schwerlastverkehrs in den nächsten zwei bis fünf Jahren rasch weiterentwickeln und zum Einsatz kommen wird.

Zukünftige Anwendungen für die heute verfügbare, jedoch noch nicht bei hohen Geschwindigkeiten eichfähige dynamische Wiegetechnologie von Straßenfahrzeugen lassen sich wie folgt strukturieren:

- landesweit strategisch aufgebaute Netzwerke halbautomatischer Wiegestationen mit Vorselektionswaagen und nachgeschalteten Eichwaagen auf Parkplätzen zur Erfassung, Aussortierung und Ahndung von überladenen Fahrzeugen
- Schutzsysteme gegen die Überlastung der Straßeninfrastruktur (Brücken, Tunnel) durch zu schwere Straßenfahrzeuge
- Kombination von WIM mit zukünftigen ADAS (fahrzeuginternes Fahrerunterstützungssystem), ELP (Elektronic License Plate) und V2I (Vehicle to Infrastructure) Technologien, um Überladungsdaten an Straßenfahrzeuge weiterzugeben, anzuzeigen und die Fahrzeugdaten und Fahrzeugidentifizierung zu erfassen
- automatische Aussortierung aus dem fließenden Verkehr mit spezieller Beschilderung und Bereitstellung der Information im Fahrzeug
- Selektionswaagen, die Überladungsdaten in ein spezielles WIM-Tag übertragen und den Fahrer zum Anfahren einer Wiegestation auffordern
- Kombination von WIM und Maut für eine verbesserte gewichtsbezogene Mauteinhebung nach dem Verursacherprinzip
- sonstige Ahndungen (Geschwindigkeit, Abstand) bezogen auf Fahrzeugklassen wie Busse und LKW zu deren Bestimmung gewichtsbezogene Daten erforderlich sind

Das Projekt ASSET [2] wird wesentlich zur Verbesserung der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit im Straßenverkehr beitragen.

7 Anhang A

Auswirkungen von Achslast und Achslastverteilung

Eine Fahrbahn hält einer bestimmten Anzahl von Achsen mit einem Standardgewicht stand. Dieses Standardgewicht je Achse wird in „equivalent single axle load“ (ESAL) gemessen, wobei eine ESAL 18 000 Pfund (8,165 Tonnen) entspricht [WEISSBARTH, C, 2003]

Die Formel zur Umrechnung des Gesamtgewichtes in ESAL lautet:

$$\left(\frac{m}{8,165t * a}\right)^4 = [ESAL](jeAchse)$$

m – Masse des Fahrzeuges in Tonnen, also nach allgemeinem Sprachgebrauch das Gesamtgewicht.

a – Anzahl der Achsen des Fahrzeuges

Zur Vereinfachung wird hier von einer gleichmäßigen Verteilung des Gesamtgewichts auf die Achslasten ausgegangen.

Zwei technische Fakten müssen erwähnt werden, um die Abnutzung der Straße zu verstehen:

Erstens steht die schadenverursachende Kraft, die auf die Straße wirkt, in der vierten Potenz zum Gewicht je Achse. Daraus ist zu folgen, dass sie stark mit dem Gewicht ansteigt, wie auch am folgenden Beispiel gezeigt wird:

Ein LKW mit 10 Tonnen Gesamtgewicht und 2 Achsen hat umgerechnet $[(10/8,165)/2]^4 = 0,1406$ ESAL. Derselbe LKW illegal mit 15 Tonnen beladen hat eine ESAL von $[(15/8,165)/2]^4 = 0,7119$. Daraus ergibt sich, dass ein Fahrzeug, welches um 50% mehr Gewicht hat, als ein anderes derselben Art, den $(0,7119/0,1406 = 5)$ 5 fachen Schaden an der Straße anrichtet. Auch kann man sehen, dass im Vergleich zu einem PKW mit einem Gewicht von ca. 800 kg $\{[(0,8/8,165)/2]^4 = 0,0000058$ ESAL} ein LKW mit 10 Tonnen den $(0,1406 / 0,0000058 = 24241)$ 24241 fachen Schaden anrichtet.

Zweitens ist es das Gewicht je Achse das für den Schaden ausschlaggebend ist und nicht das Gesamtgewicht des LKWs. Die Mautgebühr müsste also mit ansteigender Achsenzahl abnehmen, da auch der Schaden abnimmt. Ein LKW mit 10 Tonnen und zwei Achsen verursacht weitaus mehr Schaden als ein LKW mit 15 Tonnen, der die Last auf fünf Achsen verteilt:

Der Schaden, den ein LKW mit 10 Tonnen Gesamtgewicht und 2 Achsen verursacht liegt bei 0,1406 ESAL je Achse, also gesamt 0,2812 ESAL. Der Schaden eines LKW mit 15 Tonnen und 5 Achsen hingegen, liegt bei $[(15/8,165)/5]^4 = 0,01822$ ESAL (je Achse). Daraus folgt ein Gesamtschaden von 0,0911 ESAL. Also verursacht der LKW mit 2 Achsen

den $(0,2812/0,0911 = 3,08)$ 3 fachen Schaden, obwohl der LKW mit 5 Achsen 50% mehr Gesamtgewicht aufweist.

Jedoch wird hier von einer gleichmäßigen Verteilung der Achslasten ausgegangen, um die Berechnung bzw. die Darstellung zu vereinfachen.

Die Verteilung des Gesamtgewichtes auf die jeweiligen Achslasten ist jedoch zum Einen von der Bauweise des LKW und zum Anderen von der Art und Weise der Beladung des LKWs abhängig, woraus folgt, dass eine einseitige Beladung zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Achslasten, und diese ungünstige Verteilung somit zu einer höheren Schädigung der Fahrbahn führt. Wird ein LKW beispielsweise so beladen, dass im hinteren Teil der Ladefläche schwere Güter und im vorderen Teil leichte Güter transportiert werden, ist die Achslast an der oder den hinteren Achsen größer als bei einer Beladung im umgekehrten Sinn.

Dies führt dazu, dass die Schädigung der Straße, auf der dieser „ungünstiger“ beladene LKW dann fährt, größer ausfällt, als dies notwendig wäre. Das ist selbst dann der Fall, wenn das vorgeschriebene, zulässige Gesamtgewicht nicht überschritten wird.

Bleibt man beim Beispiel des LKW mit 10 Tonnen Gesamtgewicht und 2 Achsen und geht man von 2 Beladungssituationen aus, wird der Unterschied der Schädigung deutlich sichtbar.

Beladungssituation des LKW: der LKW ist gleichmäßig beladen, d.h. jede der beiden Achsen weist eine Achslast von 5 Tonnen auf.

$$(5/8,165)^4 = 0,1406 \text{ ESAL der 1. Achse}$$

$$(5/8,165)^4 = 0,1406 \text{ ESAL der 2. Achse}$$

2. Beladungssituation des LKW: die 1. Achse weist 3 Tonnen Achslast auf, die 2. Achse weist 7 Tonnen Achslast auf.

$$(3/8,165)^4 = 0,0182 \text{ ESAL der 1. Achse}$$

$$(7/8,165)^4 = 0,5402 \text{ ESAL der 2. Achse}$$

Das ergibt für das gleiche Fahrzeug in einer anderen Beladungssituation insgesamt 0,5584 ESAL.

Werden die beiden Werte nun in Relation zueinander betrachtet, zeigt sich, dass der ungünstiger beladene LKW den $(0,5584/0,2812 = 1,986)$ ca. 2 fachen Schaden verursacht, obwohl das Gesamtgewicht in beiden Situationen gleich groß ist.

8 Literaturverzeichnis

- BUSCHMEYER, W.; SCHNELLENBACH - HELD, M.; LUBASCH, P.: Schwerlastverkehr auf Bundesfernstraßen: Erfassung, Erhaltungsbedarf für Brücken. Forschungsbericht FE-Nr. 15.0388/2003/GRB, Essen, 2007.
- GLAESER, K.-P.; KASCHNER, R.; LERNER, M.; RODER, K.; WEBER, R.; WOLF, A.; ZANDER, U.: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. BASt, Bergisch Gladbach, 2006.
- GRÜNBERG, J.; HANSEN, M.; LIEBIG, J.P.: Ermüdungsbeanspruchungen von Betonbrücken unter zunehmendem Schwerverkehr. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 9, S. 596-606, 2007.
- HABERL, J.: Durchführung und Auswertung von Weigh-in-Motion Messungen an einer Brücke in Wien. Diplomarbeit am Institut für Stahlbeton- und Massivbau TU Wien, S. 11. 2002
- HERRY, M., SEDLACEK N: Österreichische Wegekostenrechnung für die Straße 2000. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung Heft 528, Wien. 2003.
- KALINA, T. Bewertung von Achslastwiegesystemen im Rahmen des Continental Motorway Tests. Diplomarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung TU Wien 2002.
- LUBASCH, P.: Identifikation von Verkehrslasten unter Einsatz von Methoden des Soft Computing. Dissertation Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften der Universität Duisburg-Essen Essen 2009.
- NAUMANN, J.: Die Brückenerhaltung ist für Ingenieure eine neue Herausforderung. Der Prüflingenieur, Ausgabe Oktober 2002, S. 46-52, 2002.
- NAUMANN, J.; FRIEBEL, W.-D.; HOLST, R.: Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Eine verantwortungsvolle Aufgabe für die Sicherheit. Straße und Autobahn 56, S. 319-326, 2005.
- NAUMANN, J.: Aktuelle Entwicklungen im Straßenbrückenbau. Stahlbau 75, S. 779-785, 2006.
- NAUMANN, J.: Brücken und Schwerverkehr – wo sind die Grenzen? Bauingenieur, Band 82, S. 25-29, Juli/August 2007.
- OPITZ, R.; KÜHNE, R.: IM (Integrated Matrix) WIM Sensor and Future Trials. Tagungsband '4th International Conference on WIM, ICWIM4, Taipei, S. 61-71, 2005
- OPITZ, R. : ROC Rigobert Opitz Consulting & Engineering; Weigh-in-Motion für Verkehrssicherheit, Schutz der Infrastruktur und Enforcement; WIM Marketing Report BI V01.doc, Oktober 2007

SAMOL, J.; BUSCHMEYER, W.; SCHNELLENBACH - HELD, M.: Zur Genehmigung von Schwertransporten. Straßenverkehrstechnik 50, S. 91-94, 2006.

VAN LOO, H.; HENNY, R.: REMOVE, Requirements for Enforcement of Overloaded Vehicles in Europe. Tagungsband 4th International Conference on WIM, ICWIM4, Taipei, S. 255-262, 2005.

VDA - Verband der Automobilindustrie Jahresbericht 2006. Frankfurt am Main, 2006.

WAVE (Editor: Jacob, B.): Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE), General Report. 4th Framework Program Transport, RTD Project, RO-96-SC, 403, Paris, 2001.

WEISSBARTH, C, 2003 Theoretische Analyse von Straßennutzungsgebühren [online], (Bearbeitungsstand 2003). Regensburg, Universität Regensburg. URL: <http://www-cgi.uni-regensburg.de/Fakultaeten/WiWi/Wiegard/start/de/lehre/2003/seminar/seminar/t18/weissbarth.pdf>

Quellen aus dem Internet

- [1] TOP TRIAL Weigh in motion for truck overload enforcement (2000 – 2002); URL: www.opitz-consult.de/top/index.html
- [2] EU Projekt ASSET, Advanced Safety and Driver Support for Essential Road Transport. URL: <http://project-asset.com>
- [3] Zivilingenieurbüro Petschacher, PEC ZT-GmbH & PSP GmbH. URL: www.petschacher.at
- [4] Kistler – sensors for pressure, force, acceleration and torque. URL: www.kistler.com
- [5] Dehnungsmessstreifen Enzyklopädie, URL: <http://www.enzyklo.de/Begriff/Dehnungsmessstreifen>
- [6] Klaus Lipinski.: Sensoren, V2 ,DATACOM – Buchverlag GmbH 84378 Dietersburg URL: http://www.itwissen.info/fileadmin/user_upload/EBOOKS/2009_12_Sensoren.pmd.pdf
- [7] HYDRO-CARDAN, Heid-Werkstrasse 13, 2000 Stockerau – Austria, URL: <http://hydro-cardan.at>
- [8] Yale Industrial Products GmbH, URL: <http://yale.de>
- [9] LUKAS Hydraulik GmbH, URL: www.lukas.de
- [10] Comatrol GmbH, URL: www.comatrol.com

- [11] HYDAC International, URL: www.hydac.com
- [12] Manuli Hydraulics, URL: www.manuli-hydraulics.com
- [13] Pix Europe Ltd, Belts & Hoses, URL: www.pixeuro.com
- [14] Parker Hannifin Corporation , URL: www.parker.com
- [15] Sartorius AG: Biotechnologie und Mechatronik für Labor und Prozessindustrie. URL: www.sartorius.com
- [16] : www.oiml.org