

Masterarbeit

**PROTOTYP EINES PRÜFSTANDES ZUR
VALIDIERUNG EINES
REIFENDRUCKKONTROLLSYSTEMS**

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Markus Gutmann, BSc

1810322015

betreut und begutachtet von

FH-Prof. DI Dr. techn. Manfred Pauritsch

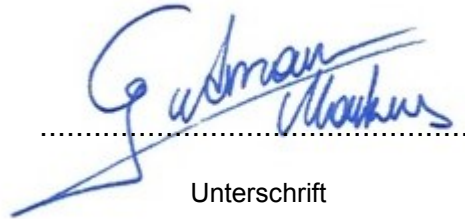
Graz, im Dezember 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Gutmann Markus", written over a horizontal dotted line.

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir während der Erstellung meiner Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meiner Verlobten, die mich während des Studiums und dieser Arbeit persönlich und mit viel Rückhalt unterstützt hat.

Darüber hinaus möchte ich auch meinem Betreuer im Unternehmen, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gernot Högler für seinen Einsatz danken.

Mein Dank gilt weiters meinem Betreuer, Herrn FH-Prof. DI Dr. techn. Manfred Pauritsch, der mich zielführend und mit viel Engagement bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt hat.

KURZFASSUNG

Reifen bilden die einzige Verbindung zwischen Fahrzeugen und der Fahrbahn ab. Aus diesem Grund sind sie eine der wichtigsten Grundlagen für ein sicheres Fahren. Hierfür müssen die Reifen jedoch einen den Vorgaben entsprechenden Luftdruck vorweisen. Die Überwachung des Luftdruckes passiert in modernen Fahrzeugen mit Hilfe von Reifendruckkontrollsystemen. Bevor diese Systeme jedoch in einem Fahrzeug zur Anwendung kommen, müssen sie durch den Einsatz und die Unterstützung von Prüfständen abgesichert werden.

In dieser Masterarbeit wird ein Prototyp für einen Reifendruckkontroll-Prüfstand entwickelt, wobei ein eigenständiges und neues Konzept für den Prüfstand erstellt und umgesetzt wird. Es wird gezeigt, wie eine Regelung für den Druck und die Temperatur innerhalb der Druckkammer realisiert werden kann. Zudem werden die Reifendruckkontrollsensoren durch einen Motor in Bewegung versetzt. Anhand der Verwirklichung einer grafischen Oberfläche können Druck, Temperatur und die Drehzahl am Prüfstand variiert werden.

Tests am Prototyp zeigen, dass der Prüfstand alle erforderlichen Parameter eines Reifendruckkontrollsystems nahezu automatisiert stimulieren kann. Durch den Einsatz einer Antenne ist die Funkübertragung trotz des Faraday'schen Käfigs der Druckkammer sichergestellt. Es wird aufgezeigt, dass es dennoch Verbesserungsbedarf gibt, bevor der Prüfstand für Validierungen von Reifendruckkontrollsystemen eingesetzt werden kann.

ABSTRACT

Newly implemented systems in the automotive sector have to be fully validated before the start of production because customers expect a vehicle without any faults and compromises. Magna is responsible for the development and verifying of new automotive components. Consequently, special test benches are applied to examine new systems. For the validation of tire pressure monitoring systems, a test bench is necessary but currently not available on the market.

The first aim of this master's thesis is to develop a prototype test bench where tire pressure monitoring systems can be examined. Therefore, in this thesis the implementation and assembly of a pressure chamber is demonstrated. In addition, the second aim is to develop a control software for the test bench to regulate the pressure, the temperature and the revolution of tire pressure sensors inside this chamber.

Tests with this prototype established the function of the test bench and represent the capability for the validation of tire pressure monitoring systems. Temperature, pressure and the revolution of tire pressure sensors can be controlled with the newly created graphical user interface. Although the pressure chamber is a Faraday cage the radio transmissions between the tire pressure sensors and the control unit are ensured. Furthermore, the development of the prototype, the control software and the gathered results within this master's thesis can be used for future improvements and detailed, specific tests of this test bench.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Zielsetzung und Gliederung der Arbeit | 2 |
| 2 | Reifendruckkontrollsysteme | 4 |
| 2.1 | Indirektes Reifendruckkontrollsystem | 5 |
| 2.2 | Direktes Reifendruckkontrollsystem | 7 |
| 2.2.1 | Warnszenarien..... | 9 |
| 2.2.2 | Systemkomponenten | 10 |
| 2.2.3 | Datenübertragung..... | 13 |
| 3 | Druck-, Temperatur- und Drehzahlmessung..... | 15 |
| 3.1 | Druck..... | 15 |
| 3.1.1 | Druckmessung | 15 |
| 3.1.2 | Drucksensoren..... | 17 |
| 3.2 | Temperatur | 21 |
| 3.2.1 | Temperaturmessung..... | 22 |
| 3.2.2 | Temperatursensoren | 23 |
| 3.2.3 | Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur | 25 |
| 3.3 | Drehzahl..... | 27 |
| 3.3.1 | Drehzahlmessung | 27 |
| 3.3.2 | Drehzahlsensoren..... | 27 |
| 4 | Regler..... | 29 |
| 4.1 | Steuerung – Regelung | 29 |
| 4.1.1 | Steuerung | 29 |
| 4.1.2 | Regelung..... | 30 |
| 4.2 | Grundstruktur eines Regelkreises | 32 |
| 4.3 | PID-Regler | 32 |
| 5 | Konzept des Prototyps | 34 |
| 5.1 | Vorgaben | 34 |
| 5.2 | Konzept..... | 34 |
| 6 | Auswahl der Komponenten | 37 |
| 6.1 | Sensoren..... | 37 |
| 6.1.1 | Temperatursensor und Messumformer | 37 |
| 6.1.2 | Drucksensor..... | 39 |
| 6.2 | Antrieb..... | 41 |
| 6.2.1 | Motor..... | 41 |
| 6.2.2 | Speed Controller | 42 |
| 6.3 | Magnetventile..... | 43 |
| 6.4 | Heizmatte..... | 44 |
| 6.5 | Software für die Ansteuerung | 45 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.5.1 | LabVIEW | 46 |
| 6.5.2 | Hardware Schnittstelle | 48 |
| 6.5.3 | Berechnung der Auflösung | 50 |
| 6.6 | RDK-System | 51 |
| 7 | Konzeption der Druckkammer | 52 |
| 7.1 | CAD-Konstruktion | 52 |
| 7.2 | Aufbau | 53 |
| 7.3 | Konzepterweiterung | 55 |
| 7.3.1 | Faraday'scher Käfig | 55 |
| 7.3.2 | Antenne | 56 |
| 7.3.3 | Berechnung der Länge der Antenne | 57 |
| 8 | Versuchsmessung der Druckkammer | 58 |
| 8.1 | Prüfen der Dichtheit | 58 |
| 8.2 | Prüfen der Funkübertragung | 59 |
| 9 | Aufbau des Prüfstandes | 61 |
| 9.1 | Verkabelung | 61 |
| 9.2 | Einstellungen des Motors | 61 |
| 9.3 | Prüfen und Einstellen der I/O-Anschlüsse für LabVIEW | 62 |
| 9.4 | Prototyp des RDK-Prüfstandes | 64 |
| 10 | Umsetzung der Ansteuerung | 65 |
| 10.1 | Ansteuerung des Prüfstandes | 66 |
| 10.2 | Regelung des Prüfstandes | 68 |
| 10.2.1 | Temperaturregelung | 68 |
| 10.2.2 | Druckregelung | 69 |
| 11 | Test des Prüfstandes | 71 |
| 11.1 | Einstellen des Druckes | 71 |
| 11.2 | Regelung der Temperatur | 72 |
| 11.3 | Regelung des Druckes | 74 |
| 12 | Ergebnisse der Tests | 76 |
| 13 | Altes System vs. neues System | 77 |
| 14 | Zusammenfassung und Ausblick | 79 |
| | Literaturverzeichnis | 81 |
| | Abbildungsverzeichnis | 87 |
| | Tabellenverzeichnis | 90 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 91 |
| | Anhang 1: Anschlussbelegung | 92 |

1 EINLEITUNG

Diese Masterarbeit wird in Zusammenarbeit mit Magna Steyr Fahrzeugtechnik in Graz verfasst. Magna Steyr Fahrzeugtechnik produziert nicht nur Fahrzeuge, sondern entwickelt und integriert Module und Systeme von der ersten Designidee bis zur Serienreife. Bei Entwicklungsprojekten ist Magna auch verantwortlich für die Integration von Systemen und Komponenten im Bereich der Fahrzeugelektrik. Genauer bedeutet dies, dass einzelne Funktionen im Fahrzeug von Magna abgesichert werden müssen. Eine Absicherung auf der Funktionsebene, wie etwa bei Reifendruckkontrollsystemen, erfordert einerseits die Prüfung der Funktion selbst auf eine korrekte Arbeitsweise und ein korrektes Verhalten im Fehlerfall und andererseits, abhängig von der Auftraggeberin oder dem Auftraggeber, auch eine Benchmark von verschiedenen Konkurrenten am Fahrzeugmarkt.

Für die Absicherung diverser Systeme und Funktionen für ein Fahrzeugentwicklungsprojekt ist es auch notwendig, dass diese auf geeigneten Prüfständen abgesichert werden können. Es ist erforderlich, dass die Absicherung auf den Prüfständen dasselbe Ergebnis wie eine Absicherung im Fahrzeug ergibt. Dadurch können nicht nur eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausstattungsvarianten abgesichert und geprüft, sondern auch Aussagen über die Funktionalität der Systeme schon vor der Verfügbarkeit von Prototypfahrzeugen getätigt werden. Dies erlaubt in weiterer Folge eine wesentlich höhere und detailliertere Absicherung in Prototypfahrzeugen und trägt auch erheblich zu einer Reduzierung dieser Fahrzeuge und dadurch auch der Kosten in der Entwicklungsphase bei.

Dasselbe gilt auch für Reifendruckkontrollsysteme. Ist es möglich diese Systeme schon in einem frühen Entwicklungsstadium bereits nahezu vollständig an einem Prüfstand abzusichern, so kann dadurch die Absicherung an Prototypfahrzeugen reduziert werden.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Aktuell werden Reifendruckkontrollsysteme nahezu ohne einen Prüfstand validiert. Das hat auch die Konsequenz, dass Prüfungen nur sehr schwer und unter großem Aufwand wiederholt werden können. Weiters ist es im Moment nicht möglich den kompletten Umfang eines Reifendruckkontrollsystems am Prüfstand zu validieren, da nicht alle Parameter gleichzeitig stimuliert werden können. Prüfungen, bei denen bestimmte Manipulationen des Sensors durchzuführen sind bzw. wo speziell manipulierte Sensoren notwendig sind, z. B. zum Testen der Batterielebensdauer, haben es zur Aufgabe, den Sensor im Reifen zu tauschen. Diese Aufgabe ist bei der aktuellen Möglichkeit bzw. bei der aktuellen Validierung auf Dauer sehr aufwendig und zeitintensiv.

In dieser Arbeit wird ein Prototyp für einen herstellerunabhängigen Reifendruckkontroll-Prüfstand entwickelt. Hierfür wird ein neues Konzept ausgearbeitet, der Prototyp-Prüfstand aufgebaut und eine Ansteuerung für diesen umgesetzt. Dabei werden alle relevanten Parameter des Systems, wie etwa der Druck, die Temperatur und zusätzlich auch die Drehzahl der Reifendruckkontrollsensoren über eine grafische Bedienoberfläche eingestellt. Für die Umsetzung dieses Prototyps wird eine Druckkammer realisiert, in welcher der Druck und die Temperatur geregelt werden können. Zusätzlich wird darin die Drehzahl der Reifendruckkontrollsensoren variiert. Dadurch soll die Möglichkeit entstehen,

Reifendruckkontrollsysteme bereits vor der Verfügbarkeit von realen Fahrzeugen zu testen und zu validieren.

Dadurch ergibt sich die Forschungsfrage wie folgt: Wie kann ein Prototypprüfstand für die Validierung von Reifendruckkontrollsystemen umgesetzt werden?

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen Prototyp eines Reifendruckkontroll-Prüfstandes zu entwickeln, aufzubauen und eine Ansteuerung sowie eine Regelung umzusetzen, bei dem Reifendruckkontrollsysteme, unabhängig vom Hersteller, bereits im Labor nahezu vollständig und automatisiert validiert werden können. Dieser Prüfstand soll die Absicherung von Reifendruckkontrollsystemen in zukünftigen Projekten vereinfachen und die Reproduzierbarkeit von Tests erhöhen.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit werden Reifendruckkontrollsysteme und die verschiedenen Ausführungen näher erläutert. Zusätzlich werden wesentliche Systemkomponenten und deren Aufgabe beschrieben.

Im dritten Kapitel wird auf die Druck-, Temperatur- und Drehzahlmessung eingegangen und diese Begriffe erklärt. Weiters werden Möglichkeiten aufgezeigt, um diese Messungen durchzuführen und geeignete Sensoren hierfür vorgestellt. Es wird auch auf den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur hingewiesen.

Kapitel 4 gibt einen Einblick in den Unterschied zwischen Steuerung und Regelung. Zusätzlich wird die Grundstruktur eines Regelkreises gezeigt und der in der Praxis am häufigsten eingesetzte Regler, der PID-Regler, beschrieben.

Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit dem Konzept für den Prototypen. In diesem Kapitel sind auch die Vorgaben für den Prüfstand definiert.

Die ausgewählten Sensoren und Aktoren, entsprechend dem Konzept für diesen Prüfstand, werden in Kapitel 6 erläutert. Zudem wird auf die Software für die Umsetzung der Ansteuerung für den Prüfstand eingegangen. Außerdem wird jenes Reifendruckkontrollsystem, welches für den Prüfstand verwendet wird, erklärt.

In Kapitel 7 sind die Konstruktion sowie auch der Aufbau des Prototyps beschrieben. Zusätzlich werden die durch den Aufbau bedingten Änderungen bzw. Ergänzungen des Konzeptes in diesem Kapitel erläutert.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit der Versuchsmessung für die Dichtheit der Druckkammer und auch der Prüfung der Funkübertragung zwischen den Sensoren und dem zentralen Steuergerät des Reifendruckkontrollsystems.

Der Aufbau des Prüfstandes, wie die Verkabelung, die notwendigen Einstellungen des Motors sowie die Prüfung der zur Ansteuerung des Prüfstandes notwendigen I/O-Anschlüsse sind in Kapitel 9 erklärt.

In Kapitel 10 wird die Umsetzung der Ansteuerung für den Prüfstand durchgeführt. Dabei wird mit einer Ansteuerung für den Prüfstand gestartet und diese um die Temperatur- und Druckregelung erweitert.

Kapitel 11 zeigt, dass die Ansteuerung bzw. die Regelung des Prüfstandes funktioniert und die eingestellten Werte der Druckkammer vom Reifendruckkontrollsystem empfangen werden.

Die wesentlichen Ergebnisse der Tests aus dem Kapitel 11 sind in Kapitel 12 erwähnt und zu finden.

Die Gegenüberstellung des aktuellen Systems und des neuen Prototyps ist in Kapitel 13 erläutert.

Kapitel 14 gibt eine Zusammenfassung über die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Masterarbeit sowie eine Handlungsempfehlung für die Zukunft.

2 REIFENDRUCKKONTROLLSYSTEME

Die Reifen eines Fahrzeuges bilden eine der wichtigsten Grundlagen für sicheres, komfortables und Treibstoff sparendes Fahren eines Fahrzeuges. Vorausgesetzt ist jedoch, dass die Reifen entsprechend den Herstellervorgaben befüllt sind. Sehr häufig ist das jedoch nicht gegeben – es herrscht ein regelrechter Missstand, auf den die Behörden reagiert haben. Dadurch wurden die Fahrzeughersteller verpflichtet, fast alle ihre Fahrzeugmodelle mit Reifendruckkontrollsystemen (RDK-Systemen) auszustatten.¹

Reifendruckkontrollsysteme zählen zu jenen Fahrerassistenzsystemen, die die Fahrzeuglenkerin/den Fahrzeuglenker bei der Einhaltung des technisch einwandfreien Zustands des Fahrzeuges unterstützen. Jedoch hilft dieses System nicht bei der Bewältigung von Fahraufgaben. Durch das Reifendruckkontrollsystem wird der Druck in einem Autoreifen überwacht. Fällt dieser auf eine definierte Schwelle ab, wird eine entsprechende Warnung ausgegeben. Somit zielen Reifendruckkontrollsysteme darauf ab, die Fahrerin/den Fahrer auf einen zu geringen Reifendruck hinzuweisen. Durch einen zu geringen Druck im Reifen, der das einzige Verbindungsstück zwischen Fahrzeug und Straße darstellt, werden u.a. das Bremsverhalten, als auch die Handling-Eigenschaften des Fahrzeuges verschlechtert. Zusätzlich wird auch der Rollwiderstand bei sinkendem Druck erhöht. Sinkt der Druck auf oder unter den Mindestdruck ab, kommt es durch die Erhöhung der thermischen und mechanischen Belastung – aufgrund der zunehmenden Walkarbeit des Reifens – zu einer signifikanten Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Reifenversagens. Dies kann bis zum Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug führen. Dadurch übernehmen Reifendruckkontrollsysteme eine sehr wichtige Aufgabe bei der Erhöhung der Fahrzeugsicherheit, aber auch bei der Fahrzeugeffizienz.²

Ist der Reifendruck zu niedrig wird durch den Mehrverbrauch des Kraftstoffs auch der CO₂-Ausstoß erhöht. Bei einem Druckverlust im Autoreifen werden nach Schuller u.a. folgende Szenarien unterschieden:³

- **Reifenplatzer:**
Die Zeitspanne des Druckverlustes bei einem Reifenplatzer ist sehr kurz. Frühere Reifendrucksysteme konnten einen Reifenplatzer nicht erfassen.
- **Schneller Druckverlust:**
Aufgrund von im Reifen eingefahrenen Fremdkörpern (Nägel, Schrauben, etc.) entstehen schnelle Druckverluste. In der Regel liegen diese zwischen 0,1 bis zu 0,2 bar/Minute.
- **Langsamer Druckverlust:**
Durch natürliche Diffusion (Abbau von Luftmolekülen)⁴ entstehen langsame Druckverluste. Dabei wird von einer Verlustrate von ca. 0,1 bar/Monat ausgegangen. Entsprechend der derzeitigen Entwicklungsstände sind Druckverluste durch Diffusion nicht vermeidbar. Dieser Gegebenheit kann nur durch regelmäßige Prüfung der Reifendrücke entgegengewirkt werden.

¹ Vgl. Osajda (2015), S. 49.

² Vgl. Sünder (o.J.), S. 1.

³ Vgl. Schuller u.a. (2011), S. 136.

⁴ Vgl. www.chemie.de (o.J.), Online-Quelle [19.06.2019].

Immer wieder werden Zahlen von Unfallforschungen veröffentlicht, in denen die Mehrheit der Fahrzeuglenkerinnen/Fahrzeuglenker mit einem falschen Luftdruck im Straßenverkehr unterwegs sind – und das mit möglicherweise fatalen Folgen. Ein falsch eingestellter Luftdruck in den Reifen verlängert nicht nur den Bremsweg, sondern verschlechtert die Spurtreue des Fahrzeuges und sorgt auch für ein unpräzises Lenkverhalten. Einfach gesprochen übernimmt ein Reifendruckkontrollsystem die Aufgabe, den Luftdruck der Reifen zu prüfen, den jede Fahrerin/jeder Fahrer in früheren Zeiten selbst an einer Tankstelle kontrollieren hätte sollen. Jedoch bietet das System den Vorteil, dass die Überwachung des Reifendruckes automatisch und permanent erfolgt. Weicht dieser Luftdruck in einem Reifen um 0,2 bar vom eingestellten Sollwert ab, wird dies durch eine Warnleuchte im Cockpit der Fahrerin/dem Fahrer signalisiert.⁵

Aus diesem Grund sind Reifendruckkontrollsysteme seit 1. November 2014 für alle innerhalb der EU neu verkauften Fahrzeuge der Klasse M1 (Personenkraftfahrzeuge bis 3,5 t höchstzulässiges Gesamtgewicht) Pflicht und müssen diese auch serienmäßig aufweisen.⁶ In den USA hingegen sind RDK-Systeme für neu verkaufte Fahrzeuge bereits seit dem Jahr 2007 Pflicht.⁷

Reifendruckkontrollsysteme gibt es als direkte und indirekte Systeme. Diese beiden unterschiedlichen Systeme werden im Folgenden näher betrachtet. Dadurch, dass sich diese Masterarbeit auf die direkten Reifendruckkontrollsysteme bezieht, liegt der Fokus auf diesem System.

2.1 Indirektes Reifendruckkontrollsystem

Systeme, welche den Luftdruck im Reifen indirekt messen, nutzen bereits vorhandene Sensoren und Messwerte aus dem ABS/ESP (Antiblockiersystem/elektronisches Stabilitätsprogramm)-System und falls vorhanden aus Fahrdynamiksystemen im Fahrzeug. Dabei wird mittels Algorithmen eine Änderung des Reifendruckes berechnet. Diese Systeme benötigen keine zusätzliche Hardware – die Berechnung erfolgt in bereits verbauten Komponenten des Fahrzeuges, und zwar meist im ABS/ESP-System. Diese Systeme sind Vergleichssysteme und können den Absolutdruck eines einzelnen Reifens nicht messen.⁸

Es wird folgendes Prinzip bei der Berechnung verfolgt: Bei einem Druckverlust in einem Reifen ändert sich nicht nur der dynamische Rollradius des betroffenen Reifens, sondern es steigt dadurch bei konstanter Geschwindigkeit des Fahrzeuges auch die Raddrehzahl dieses Reifens im Vergleich zu den anderen. Durch die Verwendung eines Differentials können sich die Reifen mit unterschiedlicher Drehzahl drehen. Die Abrollumfänge der Reifen können im Fahrbetrieb sehr einfach gemessen werden, da diese auch bei der Radgeschwindigkeitsmessung für die ABS-Regelung notwendig sind und dauerhaft zur Verfügung stehen. Eine Änderung des Luftdruckes im Reifen bzw. eine entsprechende Drehzahländerung wird vom System erkannt und zur Anzeige bzw. Warnung gebracht.⁹

⁵ Vgl. www.continental-reifen.de (2018), Online-Quelle [11.07.2019].

⁶ Vgl. www.oeamtc.at (o.J.), Online-Quelle [11.07.2019].

⁷ Vgl. Köllner (2016), Online-Quelle [11.07.2019].

⁸ Vgl. Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 111.

⁹ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 254 f.

Zuallererst muss das Verhältnis der Abrollumfänge, welche in Ordnung sind, dem indirekten System mitgeteilt werden. Zudem müssen bestimmte Fahrzustände wie Fahren mit Schneeketten, Fahren auf Schotter oder sehr schlechten Fahrbahnen, wie Feldwege vom System erkannt werden. So müssen spezielle Algorithmen diese Fahrzustände erkennen und entsprechend ausblenden – auch eine einfache Kurvenfahrt, bedingt durch die unterschiedlichen Raddrehzahlen, muss separat behandelt werden. Zu beachten gilt es aber auch, dass der Abrollumfang eines Reifens in erster Linie von der Radlast und erst in zweiter Linie vom Luftdruck abhängt. Aus diesem Grund müssen z. B. ein Anhängerbetrieb, unsymmetrische Beladungen und Dachlasten des Fahrzeuges vom indirekten Reifendruckkontrollsystem im Vorfeld mitentwickelt werden. Bei diesem System wird der Abrollumfang in Geschwindigkeitsklassen eingeteilt. Wird z. B. mit einem neuen und drei gebrauchten Reifen gefahren, ändert sich das Verhältnis der Abrollumfänge. Sind die Fahrgeschwindigkeiten höher, ist der Unterschied der Abrollumfänge geringer.¹⁰

In Abbildung 1 ist die Funktionsweise des indirekten RDK-Systems, wie oben beschrieben, dargestellt. Ist das Verhältnis der Abrollumfänge einmal eingelernt, werden diese dauerhaft miteinander in ein Verhältnis gebracht. Weichen diese jedoch zu stark voneinander ab, z. B. durch einen platten Reifen, wird dies vom System, in diesem Fall vom Steuergerät ESP erkannt und für die Fahrerin/den Fahrer zur Anzeige gebracht.¹¹

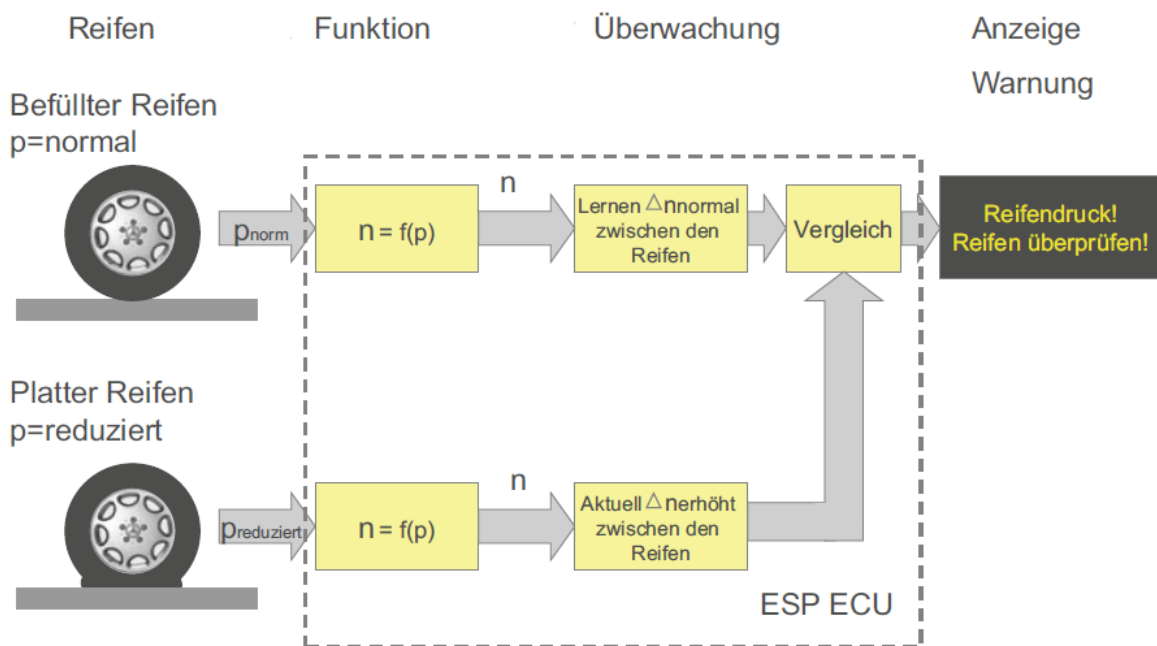


Abbildung 1: Funktion des indirekten RDK-Systems, Quelle: Leister (Hrsg.) (2015), S. 255.

Indirekte Systeme haben den Nachteil, dass z. B. schleichende Druckverluste an einer Achse nicht erkannt werden können. Hierfür ist ein Druckunterschied $> 0,5$ bar notwendig.¹²

¹⁰ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 255 f.

¹¹ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 254 ff.

¹² Vgl. Wiesinger (o.J.), Online-Quelle [13.07.2019].

Indirekten Systemen ist es grundsätzlich nicht möglich Diffusionsverluste zu erkennen. Für diesen Zweck gibt es indirekte Reifendruckkontrollsysteme mit Diffusionserkennung, bei denen zusätzlich die Eigenfrequenz jedes einzelnen Reifens analysiert wird. Hierfür ist nach jedem Befüllvorgang des Reifens mit Luft ein erneutes Anlernen des Systems notwendig, um auch die Eigenfrequenz der Reifen in das System einzulernen. Der Reifengürtel schwingt dabei mehr, wenn der Reifen eine hohe Seitenwand, also ein hohes Querschnittsverhältnis besitzt. Dabei werden für jedes einzelne Rad, durch eine Spektralanalyse und einer anschließenden Fourier-Transformation, die Erregerfrequenzen der Schwingungen vom Fahrzeughersteller festgestellt. Für Systeme mit einer Frequenzauswertung ist es relativ einfach Druckverluste zu erkennen. Grundsätzlich sind Reifenschäden bzw. fatale Reifenschäden über den Drehzahlunterschied einfacher zu detektieren als Diffusionsverluste, da es sich dabei um schleichende Druckverluste handelt.¹³

2.2 Direktes Reifendruckkontrollsystem

Direkt messende RDK-Systeme ermitteln durch im Inneren der Reifen angebrachte Sensoren Werte für Temperatur und Luftdruck. Diese gemessenen Werte werden mittels Funkübertragung einer Auswerte-Elektronik zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt.¹⁴

In Abbildung 2 ist ein typischer, in den Reifen verbauter, direkter RDK-Sensor mit Luftventil dargestellt.



Abbildung 2: Direkter RDK-Sensor mit Luftventil, Quelle: Wiesinger (o.J.), Online-Quelle [13.07.2019].

Eine wichtige Aufgabe des direkten Reifendruckkontrollsystems ist die Erkennung und Ortung jener Radelektronik, die am eigenen Fahrzeug verbaut ist. Um dies zu ermöglichen, muss jeder Sensor seine eigene unverwechselbare Kennung besitzen. Dadurch kann auch die Position der montierten RDK-Sensoren vom System festgestellt werden. Dies geschieht entweder durch Antennen in jedem einzelnen Sensor oder durch eine einzige Antenne, angeschlossen an der Auswerte-Elektronik, welche die

¹³ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 256.

¹⁴ Vgl. Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 111.

Feldstärkeinformationen und die Drehrichtung der Sensoren erkennt. In Abbildung 3 ist die Positionszuordnung der Luftdrücke der Reifen als Information an die FahrerIn/den Fahrer dargestellt.¹⁵



Abbildung 3: Positionszuordnung der Luftdrücke, Quelle: Jordan (2013), Online-Quelle [29.07.2019].

Der Soll-Luftdruck muss durch einen Kalibrierknopf zuerst im System eingelernt werden. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die Warnung bei einer Reifenpanne präzise erfolgen kann, da durch das Einlernen die Anfangsdrücke und auch deren Abweichungen von Rad zu Rad bekannt sind. Zum anderen können unabhängig vom Fahrzeughersteller bekanntgegebene Luftdrücke eingelernt und überwacht werden. Zu niedrige Luftdrücke müssen jedoch vom System erkannt werden und dürfen nicht in dieses eingelernt werden.¹⁶

Der Vorteil gegenüber dem indirekten RDK-System liegt darin, dass die Messung exakter ist und Alarme bzw. Meldungen an die FahrerIn/den Fahrer bereits ab 0,2 bar Druckdifferenz möglich sind. Messgenauigkeiten kleiner als 0,2 bar sind in der Praxis weder notwendig noch sinnvoll, da es durch Abkühlungen z. B. durch den kühlen Morgen und Erwärmungen wie etwa durch die heiße Mittagssonne zu Druckunterschieden von mehr als 0,3 bar kommen kann. Weiters können mit dem direkten RDK-System auch plötzliche Druckabfälle erkannt und mitgeteilt werden. Je nach Hersteller können auch Reifenstecher erkannt und an die Alarmanlage des Fahrzeuges weitergemeldet werden. Da jeder Reifen einen eigenen Sensor benötigt, ist dieses System teuer und aufwendig, da abhängig vom verwendeten Hersteller Sensoren eventuell erst an das entsprechende Rad angelehrt werden müssen.¹⁷

¹⁵ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 258.

¹⁶ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 258 f.

¹⁷ Vgl. Wiesinger (o.J.), Online-Quelle [13.07.2019].

Beachtet werden muss die Entscheidung, wie der Druck, welcher in den Reifen besteht, angezeigt wird. Grundsätzlich sind hier mehrere Arten möglichen. Eine Option besteht in der Anzeige des Absolutdruckes, welcher im Reifen vorherrscht. Dieser so gemessene Druck, abzüglich 1 bar, ist nahe dem Druck, der mittels Manometer z. B. an der Tankstelle gemessen werden kann. Eine andere Möglichkeit ist die Anzeige des Relativdruckes, der im Inneren der Reifen herrscht. Der Relativdruck ist jener Druck, der auch am Manometer bei einer Tankstelle angezeigt wird. Weiters kann der Druck auch temperaturkompensiert angezeigt werden, wodurch es einfach ist Leckagen im Reifen festzustellen. Ein temperaturkompensierter Druck hat allerdings Abweichungen gegenüber jener Messmethode an der Tankstelle. Abhängig von der Temperatur kann das ein Vielfaches von 0,1 bar sein.¹⁸

Gesetzgebungen verlangen, dass im Reifen der Relativdruck eingestellt werden muss. Das bedeutet, dass der tatsächlich vorherrschende Umgebungsdruck vom System beachtet wird, die Temperatur jedoch nicht berücksichtigt werden muss. In weiterer Folge heißt das, dass ein in der Werkstatt korrekt eingestellter und eingelernter Luftdruck bei extremen Temperaturen fälschlicherweise Warnungen für die Fahrerin/den Fahrer auslösen kann.¹⁹

2.2.1 Warnszenarien

Stand der Technik sind zwei unterschiedliche Warnmeldungen, je nachdem, ob es sich um einen schleichenden oder akuten Druckverlust im Reifen handelt. Entsprechend den Angaben von Leister werden folgende zwei Warnszenarien unterschieden:²⁰

Weiche Warnung nach der Fahrt:

Mit der Zeit verliert jeder Reifen durch Diffusion Luft. Hier ist die Fahrzeuglenkerin/der Fahrzeuglenker aufgefordert selbstständig in regelmäßigen Abständen die Reifen wieder korrekt mit Luft zu befüllen. Dieser Druckabfall wird vom System erkannt und zur Anzeige gebracht. Da der Luftdruckabfall im Reifen nur geringfügig ist, wird der Warnhinweis vom System unterdrückt und die RDK-Warnlampe erst beim darauffolgenden Zündungslauf aktiviert. Diese Warnlampe erlischt, sobald ein korrekter Luftdruck im entsprechenden Reifen gemessen wird oder das RDK-System über das entsprechende Menü im Fahrzeug neu kalibriert wird. Ist der Druckverlust allerdings größer als 0,25 bar, kann es zu dauerhaften Schäden des Reifens kommen. Tritt diese Situation auf, wird zusätzlich zur RDK-Warnlampe eine Warnmeldung ausgegeben, die besagt, dass der Reifendruck korrigiert werden muss. Dadurch kann die Fahrerin/der Fahrer aktiv werden und den entsprechenden Reifen überprüfen. Ist der Reifendruck wieder korrigiert, erlöschen die Warnmeldung und auch die RDK-Kontrolllampe.

Harte Warnung während der Fahrt:

Die harte Warnung tritt ein, wenn es zu einem Reifenschaden oder zu einem unerwarteten schnellen Druckverlust kommt. Dabei werden der Warnhinweis und die RDK-Warnlampe bereits während der Fahrt

¹⁸ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 259.

¹⁹ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 259 f.

²⁰ Vgl. Leister (Hrsg.) (2015), S. 260 f.

eingblendet. Für eine harte Warnung muss der Druckverlust größer als 0,5 bar sein oder größer als 0,2 bar/Minute. Als Maßnahme muss die Fahrerin/der Fahrer sofort anhalten und den Reifen bzw. den Luftdruck im Reifen kontrollieren, da es sich z. B. auch um einen Reifenplatzer handeln kann.

Abbildung 4 zeigt im oberen Bild die Warnanzeige für die weiche Warnung nach der Fahrt für geringe Luftdruckabfälle. Im unteren Bild der Abbildung 4 ist die Anzeige für die harte Warnung während der Fahrt für größere Druckverluste im Reifen dargestellt.



Abbildung 4: Warnszenarien, Quelle: Leister (Hrsg.) (2015), S. 261.

2.2.2 Systemkomponenten

Bei einem direkten Reifendruckkontrollsystem sind mehrere Komponenten notwendig. Je nach Hersteller des Systems gibt es verschiedene Systemstrategien. Ein sehr häufig verwendetes RDK-System ist jenes mit einem zentralen Steuergerät. Dieses System ist in Abbildung 5 dargestellt. Folgende Komponenten sind in dieser Abbildung dargestellt: (1) – zentrales Steuergerät, (2) – Antenne, (3) – Radelektronik für jedes Rad.²¹

²¹ Vgl. Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 112 ff.

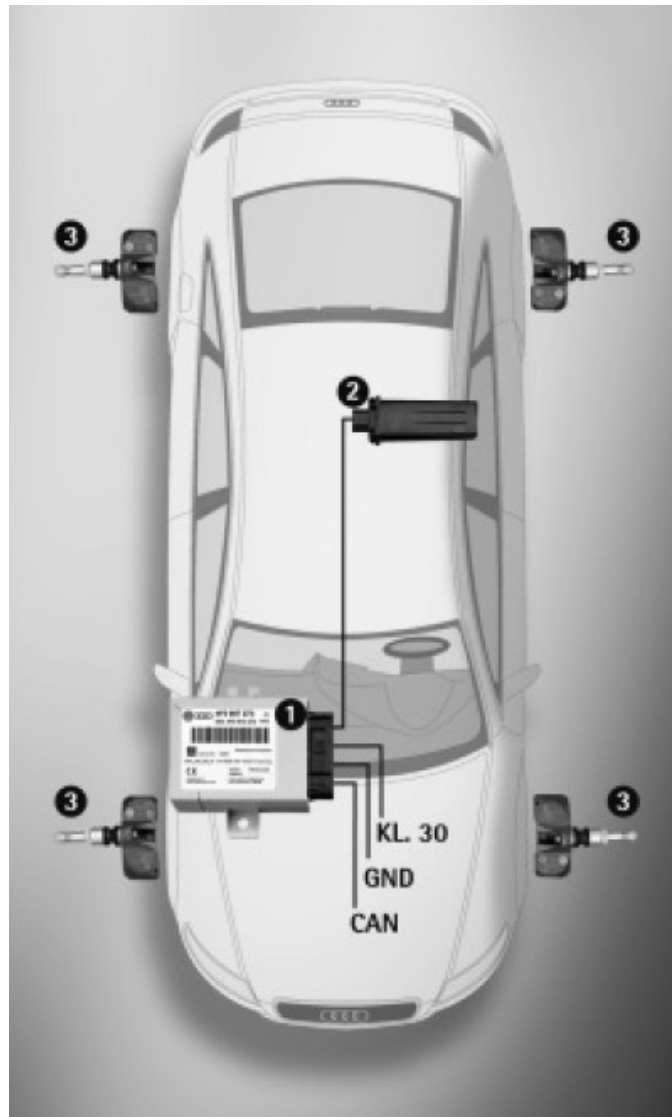


Abbildung 5: Systemkomponenten, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 113.

Nachfolgend werden diese Systemkomponenten nach Angaben von Bochmann/Kessler/Schulze beschrieben:²²

Radelektronik:

Das Herzstück dieses RDK-Systems ist die Radelektronik, welche auch als Reifendrucksensor bezeichnet wird. Diese ist im Inneren des Rades – direkt am Ventil – angebracht. Durch diese Montageposition muss die Radelektronik extremen Anforderungen der Umwelt widerstehen. So müssen diese Sensoren einen Einsatzbereich von -40 °C bis +120 °C vorweisen. Kurzzeitig sind dabei auch Temperaturen von bis zu +150 °C möglich.

Durch die Anbindung des Ventils über ein spezielles Formteil an das Gehäuse, kann die Radelektronik an nahezu allen verfügbaren Bauarten von PKW-Felgen montiert werden. Abbildung 6 zeigt auf der linken Seite die Radelektronik inklusive des Ventils in der Felge montiert. Auf der rechten Seite dieser Abbildung

²² Vgl. Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 112 ff.

wird der Schnitt durch die Radelektronik, das Ventil und die Felge mit den verschiedenen Bestandteilen dargestellt.

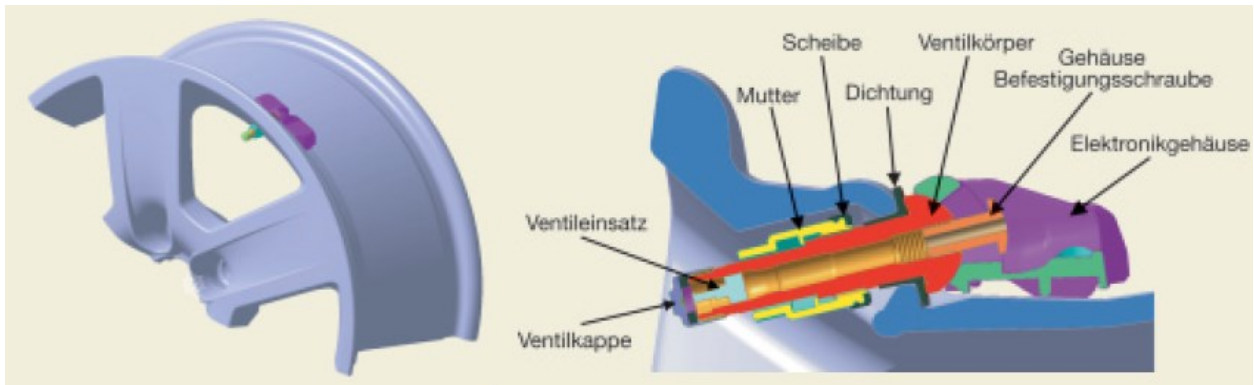


Abbildung 6: Montageposition der Radelektronik, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 114.

Die Radelektronik kann in drei elektrische Teilbereiche unterteilt werden. Die Aufgabe des ersten Bereiches ist die Druck- und Temperaturmessung sowie die Messung der Beschleunigung. Die Beschleunigung dient dabei als Hilfe damit erkannt werden kann ob sich ein Rad bewegt und der Sendemodus aktiviert werden muss. Der zweite Bereich beinhaltet die Endstufe zum Senden sowie auch den Mikrocontroller, welcher für die Steuerung des Ablaufes zuständig ist. Der dritte Bereich ist dafür verantwortlich, um das System beim Empfang von einem Triggersignal von 125 kHz in den aktiven Zustand wechseln zu lassen.

Der prinzipielle Aufbau inklusive aller notwendigen Komponenten einer Radelektronik ist in Abbildung 7 dargestellt. Zur Stromversorgung der Elektronik dient eine Lithium-Ionen-Batterie. Durch die energiesparende Elektronik hat ein Sensor eine Lebensdauer von ca. zehn Jahren, bevor dieser erneuert werden muss.

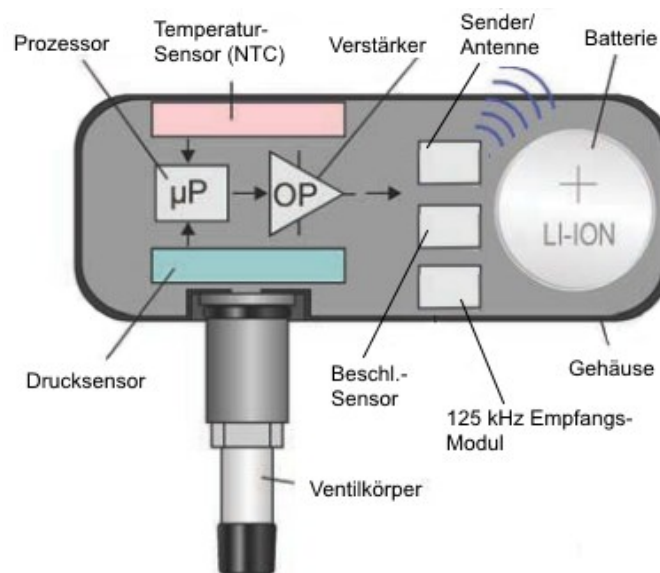


Abbildung 7: Prinzipdarstellung der Radelektronik, Quelle: Zühlke (2015), S. 30 (leicht modifiziert).

Antenne:

Je nachdem welcher Fahrzeugmarkt bedient wird, besitzt die Antenne einen 433 MHz- (z. B. für die EU) oder einen 315 MHz- (z. B. für USA) Hochfrequenz-Empfänger. Zusätzlich beinhaltet die Antenne noch

einen Demodulator und einen Datendecoder. Nachdem Informationen empfangen worden sind, werden diese demoduliert, dekodiert und anschließend als LIN (Local Interconnect Network)-Signal über ein LIN-Bus-Interface an das zentrale Steuergerät übertragen.

Zentrales Steuergerät:

Das zentrale Steuergerät hat die Aufgabe, jene Informationen, welche über die Antenne übertragen bzw. empfangen werden, zu verarbeiten. Dabei werden entsprechende und notwendige Informationen für die Fahrerin/den Fahrer zur Anzeige gebracht. Die dazu verwendeten Algorithmen werden kundenspezifisch bzw. je nach Anforderung umgesetzt.

Das Steuergerät wird mittels CAN (Controller Area Network)-Bus an das fahrzeugeigene Bordnetz angeschlossen und ermöglicht so die Kommunikation zu weiteren Steuergeräten bzw. auch die Anzeige von Informationen im Kombiinstrument bzw. im Multimediasystem.

2.2.3 Datenübertragung

Reifendrucksensoren senden ihre Informationen mittels Funkübertragung an das zentrale Steuergerät. Diese Übertragung ist in der Regel unverschlüsselt. Die Daten selbst können entweder mittels Amplitude Shift Keying (ASK) Modulation oder mittels Frequency Shift Keying (FSK) Modulation übertragen werden.²³

Bei der ASK-Modulation handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Trägeramplitude einer digitalen Bitfolge verändert wird, aber die Trägerfrequenz konstant bleibt.²⁴

Für das Frequency Shift Keying wird die Frequenz des Trägersignals verändert. Dabei wird dem digitalen High-Wert eine Frequenz und dem digitalen Low-Wert eine andere Frequenz zugeordnet. Beide Frequenzen werden zur Trägerfrequenz symmetrisch angeordnet.²⁵

Üblicherweise sind die Daten bei der Übertragung Manchester codiert.²⁶ Bei der Manchester-Codierung wird ein Bit in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wird das Bit selbst codiert, wohingegen in der zweiten Phase der Signalübergang erfolgt. Eine logisch Eins wird somit als High-Signal mit nachfolgendem Low-Signal und eine logisch Null wird mit einem Low-Signal gefolgt von einem High-Signal übertragen.²⁷

Die Übertragungsrates eines direkten RDK-Systems liegt bei 10 kbit/s bei einer Telegrammlänge von 96 Bit.²⁸

Der Aufbau eines Datentelegramms mit Synchronisation, Identifier, Druck- und Temperaturwerten, dem aktuellen Status, der Prüfsumme sowie dem Termination-Bit ist in Tabelle 1 dargestellt.

²³ Vgl. mrq (2016), Online-Quelle [31.07.2019].

²⁴ Vgl. Mietke (o.J.), Online-Quelle [05.08.2019].

²⁵ Vgl. Mietke (o.J.), Online-Quelle [05.08.2019].

²⁶ Vgl. mrq (2016), Online-Quelle [31.07.2019].

²⁷ Vgl. www.univie.ac.at (o.J.), Online-Quelle [05.08.2019].

²⁸ Vgl. Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 111.

| Byte/Bit | Verwendung |
|-----------------|--------------------------|
| Byte 1 | Synchronisation |
| Byte 2 | Synchronisation |
| Byte 3 | Identifizier MSB |
| Byte 4 | Identifizier |
| Byte 5 | Identifizier |
| Byte 6 | Identifizier LSB |
| Byte 7 | Druckwert |
| Byte 8 | Temperaturwert |
| Byte 9 | Batterie-Restlebensdauer |
| Byte 10 | Status |
| Byte 11 | CRC MSB |
| Byte 12 | CRC LSB |
| Termination-Bit | "0" |

Tabelle 1: Datentelegramm des Reifendrucksensors, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 112 (leicht modifiziert).

3 DRUCK-, TEMPERATUR- UND DREHZAHLMESSUNG

Nachfolgend wird auf den Druck, die Temperatur und die Drehzahl sowie deren Messung eingegangen und einige Sensoren bzw. Messverfahren erklärt:

3.1 Druck

Der Druck im Allgemeinen gibt an, welche Kraft senkrecht auf eine Flächeneinheit wirkt. Das heißt, Druck entspricht der Kraft pro Fläche.²⁹

$$p = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

| | |
|------------------|--------|
| $p/\text{N/m}^2$ | Druck |
| F/N | Kraft |
| A/m^2 | Fläche |

Sehr häufig wird der Druck auch in Pa (Pascal) oder Bar angegeben. Dabei entspricht $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ sowie $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.³⁰

Der in Flüssigkeiten oder auch Gasen vorherrschende Druck lässt sich sehr gut mit dem Teilchenmodell erklären. So kommt der Druck in Flüssigkeiten durch die Kraftwirkung von Teilchen zueinander und auch auf die Außenwände zustande. In einem Gas treffen frei bewegliche Teilchen aufeinander und auch auf die Außenwände. Dadurch werden Impulse übertragen, welche sich als Druck in einem Gas bemerkbar machen. Befindet sich dieser in einem abgeschlossenen Gefäß, so breitet sich der Druck in alle Richtungen aus. Das bedeutet, dass der Druck überall in diesem Gefäß gleich groß ist.³¹

Das Teilchenmodell besagt, dass alle Stoffe aus Atomen und Molekülen aufgebaut sind. Der Aufbau von Stoffen selbst wird von dem Teilchenmodell beschrieben. Nach Erläuterungen von www.lernhelfer.de sind folgende Aussagen für das Teilchenmodell gültig:³²

1. Jeder Stoff besteht aus Teilchen
2. Diese Teilchen sind in ständiger Bewegung
3. Zwischen diesen Teilchen wirken sowohl anziehende als auch abstoßende Kräfte

3.1.1 Druckmessung

Druckmessungen können dynamisch oder statisch durchgeführt werden. Statische Messungen – also Messungen ohne Bewegungen – werden z. B. bei Messungen des Wasserdruckes in einem geschlossenen Behälter oder aber auch bei der Messung des Luftdruckes in einem Luftballon durchgeführt. Ist das Medium

²⁹ Vgl. König/Lipp (2007), Online-Quelle [11.08.2019].

³⁰ Vgl. www.sofatutor.at (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019].

³¹ Vgl. www.lernhelfer.de (2010a), Online-Quelle [11.08.2019].

³² Vgl. www.lernhelfer.de (2010b), Online-Quelle [11.08.2019].

nicht mehr in Ruhe, kann sich durch diese Bewegung der Druck ändern. Hierfür sind dynamische Messungen notwendig.³³

Geräte, mit denen der Druck gemessen wird, werden als Manometer bezeichnet. Wird der Druck innerhalb der Erdatmosphäre gemessen, werden diese Messgeräte auch als Barometer bezeichnet.³⁴

Bei den Druckmessungen unterscheidet man zwischen Absolut-, Relativ- und Differenzdruckmessung. Im Folgenden werden diese Methoden nach www.ni.com näher erläutert:³⁵

Absolutdruck:

Bei der Messung des Absolutdruckes wird der Druck gegenüber dem Vakuum gemessen. Der so gemessene Druck unterliegt jedoch dem atmosphärischen Druck, welcher auf den gemessenen Druck einwirkt. Deshalb müssen die Auswirkungen des atmosphärischen Druckes bei dieser Messmethode mitberücksichtigt werden.

Relativdruck:

Der relative Druck wird relativ zu dem atmosphärischen Luftdruck gemessen. Da bei dieser Messmethode der zu messende Druck und auch der Referenzdruck vom atmosphärischen Druck beeinflusst werden, kann die Auswirkung des atmosphärischen Druckes hier vernachlässigt werden. Reifendruckkontrollsysteme gehören zu dieser Art der Druckmessung.

Differenzdruck:

Die Methode des Differenzdruckes ist sehr ähnlich dem der Messung des Relativdruckes. Jedoch wird hier als Referenzwert nicht der atmosphärische Druck verwendet, sondern ein anderer, beliebiger Referenzdruck.

In Abbildung 8 sind die Prinzipien der drei Messmethoden a) Absolutdruck, b) Relativdruck und c) Differenzdruck dargestellt.

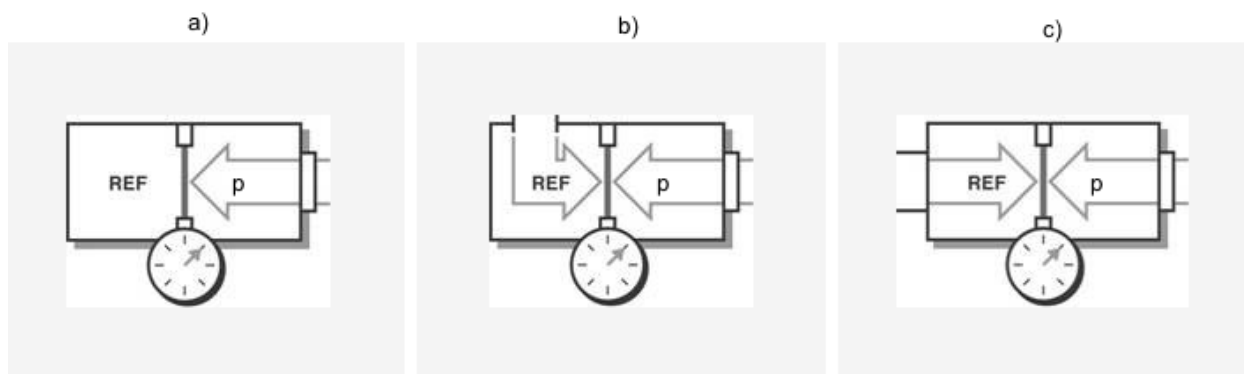


Abbildung 8: Prinzipdarstellung der Druckmessmethoden, Quelle: www.ni.com (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019] (leicht modifiziert).

³³ Vgl. www.ni.com (2019a), Online-Quelle [11.08.2019].

³⁴ Vgl. Carolus (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019].

³⁵ Vgl. www.ni.com (2019a), Online-Quelle [11.08.2019].

3.1.2 Drucksensoren

Drucksensoren sind dafür zuständig den Druck zu messen. Das Funktionsprinzip ist dabei bei nahezu allen Drucksensoren dasselbe. Der Druck wird durch einen Druckaufnehmer erfasst, weiterverarbeitet – dabei zumeist in eine elektrische Größe umgewandelt – und je nach Bedarf und Anforderung weiter verstärkt. Dieses elektrische Signal kann dann direkt angezeigt oder aber auch für z. B. automatische Steuerungen weiter genutzt und verarbeitet werden. Der Aufbau einer Druckmesseinrichtung ist als Blockschaltbild nach DIN 16086 in Abbildung 9 dargestellt. Dabei stellt 1) das Druckaufnahmeelement, 2) den Druckaufnehmer, 3) den Druckmessumformer und 4) das Druckmessgerät dar.

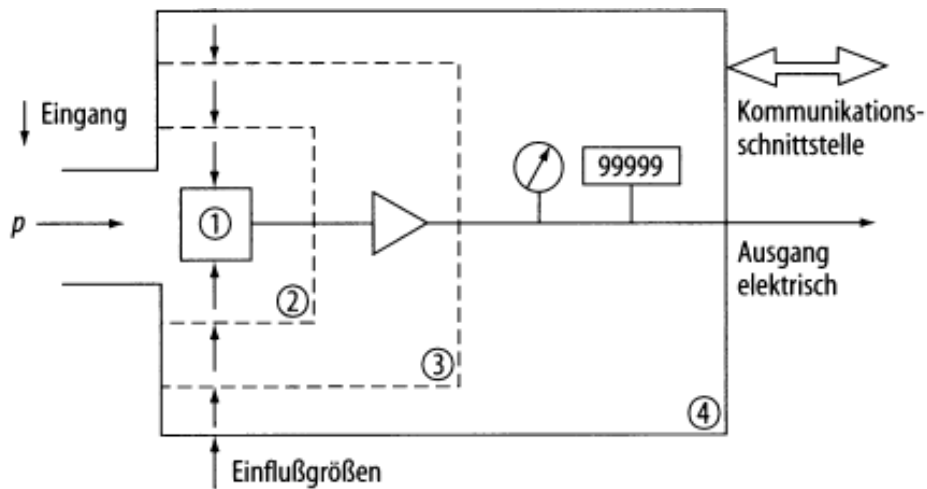


Abbildung 9: Aufbau von Druckmesseinrichtungen nach DIN 16086, Quelle: Gevatter (Hrsg.) (2000), S. 62.

Je nach Art der Druckaufnahme und entsprechender Weiterverarbeitung in ein verwertbares Signal werden Druckmessgeräte bzw. Drucksensoren nach Gevatter in folgende Kategorien eingeteilt:³⁶

- elektrische Druckaufnehmer
- mechanische Druckaufnehmer
- hydraulische Druckaufnehmer

Dadurch, dass es sich bei den für diese Arbeit verwendeten Drucksensoren um elektrische Druckaufnehmer handelt, wird in weiterer Folge nur auf diese eingegangen. Nachfolgend werden einige der gängigsten Messverfahren für elektrische Druckaufnehmer erläutert:

Piezelektrische Druckaufnehmer:

Bei den piezelektrischen Druckaufnehmern wird der Druck durch die Verwendung von piezelektrischen Materialien, wie z. B. Quarz, in eine elektrische Ladung, welche der anliegenden Kraft proportional ist, umgewandelt. Durch den Druck auf den Druckaufnehmer kommt es zu einer mechanischen Verformung und dadurch zu einer Verschiebung von positiven und negativen Ladungen der Kristalle. Die elektrische Ladung ergibt sich dabei wie folgt:³⁷

³⁶ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 61.

³⁷ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 81.

$$Q = nkF \quad (3.2)$$

| | |
|-----------------|---|
| Q/As | elektrische Ladung |
| n | Faktor, abhängig ob longitudinal oder transversal wirkendes Element |
| $k/\text{As/N}$ | Piezokoeffizient, für Quarz z. B. $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ As/N}$ |
| F/N | Kraft |

Da piezoelektrische Sensoren nur Kräfte messen, muss bei der Verwendung als Druckaufnehmer der Druck über die Fläche in eine Kraft umgewandelt werden. Durch den Einsatz eines piezoelektrischen Wandlers wird die elektrische Ladung Q in eine Spannung U umgewandelt. Dadurch, dass der piezoelektrische Wandler seine Ladung durch Verformungen verändert, wirkt dieser wie ein Kondensator. Daraus wird die Spannung wie folgt ermittelt:³⁸

$$U = \frac{1}{C} Q \quad (3.3)$$

| | |
|--------------|-----------|
| U/V | Spannung |
| C/F | Kapazität |

Piezoelektrische Sensoren können sehr schnell verändernde Drücke erfassen und bei hohen Temperaturen eingesetzt werden.³⁹

Das linke Bild in Abbildung 10 zeigt ein longitudinal wirkendes Piezoelement und das rechte Bild stellt ein transversal wirkendes Piezoelement dar. Beim longitudinalen Piezoelement werden die Quarzscheiben parallel geschaltet.⁴⁰

³⁸ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 81 f.

³⁹ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 82.

⁴⁰ Vgl. www.chemgapedia.de (o.J.), Online-Quelle [20.08.2019].

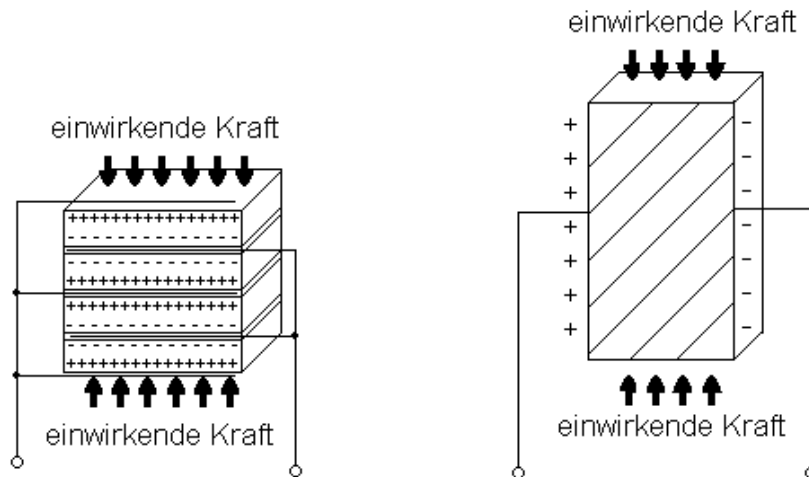


Abbildung 10: Longitudinal und transversal wirkendes Piezoelement, Quelle: www.chemgapedia.de (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019].

Piezoresistive Druckaufnehmer:

Durch Kraffteinwirkung ändert sich bei piezoresistiven Drucksensoren der spezifische Widerstand.⁴¹

Diese Widerstände sind z. B. als Wheatstone-Messbrücke verschaltet. Ändert sich der Druck, so kommt es zur Verformung der Widerstände und dadurch zu einer Änderung der Widerstandswerte. Die Messbrücke erkennt diese Veränderung und reagiert darauf mit einer Änderung der Ausgangsspannung, welche zum Druck proportional ist. Piezoresistive Drucksensoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine sehr kleine Bauweise, eine hohe Messgenauigkeit und eine hohe Empfindlichkeit aufweisen.⁴²

Abbildung 11 zeigt das Prinzip der Verformung durch Druck, wenn das Objekt Dehnung bzw. Stauchung erfährt.⁴³

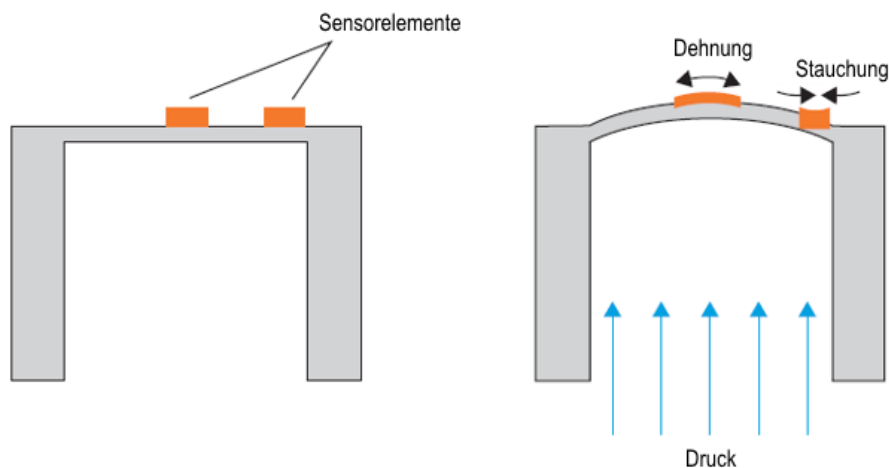


Abbildung 11: Verformung bei der resistiven Druckmessung, Quelle: Gaßmann/Gries (2009), S. 10 (leicht modifiziert).

⁴¹ Vgl. www.elektronik-kompodium.de (2019a), Online-Quelle [20.08.2019].

⁴² Vgl. Niederführ (2018), Online-Quelle [20.08.2019].

⁴³ Vgl. Gaßmann/Gries (2009), S. 9 f.

Kapazitive Druckaufnehmer:

Kapazitive Druckaufnehmer beruhen auf dem Prinzip der Messung des Plattenabstandes eines Kondensators. Die Kapazität ändert sich dabei in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den Kondensatorplatten. Abbildung 12 zeigt das Messprinzip des kapazitiven Druckaufnehmers. Durch Druckeinwirkung ändert sich der Abstand der beiden Platten und dadurch auch die Kapazität des Kondensators.⁴⁴

Die Kapazität C des Kondensators ergibt sich dabei wie folgt:

$$C = \frac{A \epsilon_0 \epsilon_r}{d} \tag{3.4}$$

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| A/m^2 | Fläche der Kondensatorplatten |
| d/m | Abstand der Platten |
| $\epsilon_0/As/Vm$ | Feldkonstante |
| ϵ_r | Dielektrizitätszahl des Mediums |

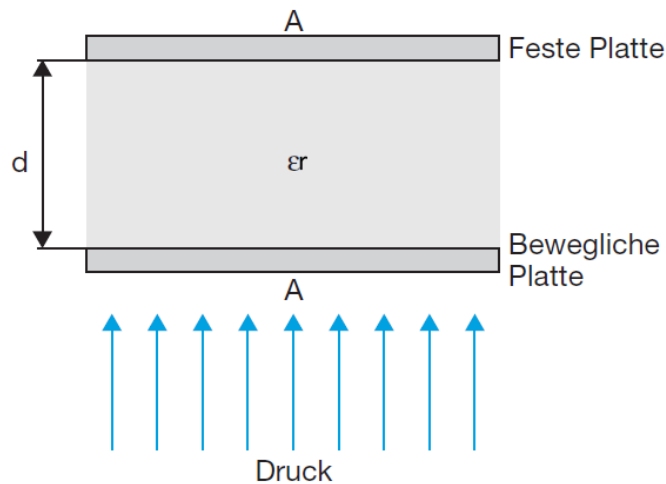


Abbildung 12: Messprinzip des kapazitiven Druckaufnehmers, Quelle: Gaßmann/Gries (2009), S. 12 (leicht modifiziert).

Kapazitive Druckaufnehmer weisen eine hohe Genauigkeit, einen robusten Aufbau und eine hohe Temperaturbeständigkeit auf.⁴⁵

Dünnschicht Druckaufnehmer:

Bei einem Dünnschicht Druckaufnehmer sind vier Widerstände, zumeist in Form von Dehnmessstreifen (DMS), zu einer Wheatstone-Brücke verschaltet.⁴⁶ Der Name ergibt sich dabei aus dem Verfahren der Dünnschichttechnik wie z. B. dem Aufdampfen. Dehnmessstreifen ändern durch eine mechanische Verformung (z. B. Druck) ihren elektrischen Widerstand.⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Gaßmann/Gries (2009), S. 11.

⁴⁵ Vgl. Weimer (2018), Online-Quelle [20.08.2019].

⁴⁶ Vgl. Wülfing (2002), Online-Quelle [20.08.2019].

⁴⁷ Vgl. Güttinger (2018), Online-Quelle [20.08.2019].

Der auf den Druckaufnehmer wirkende Druck verursacht eine Widerstandsänderung der DMS – ähnlich der Abbildung 11. Dadurch, dass die Dehnmessstreifen zu einer Brücke verschaltet sind, kann durch die Änderung der Ausgangsspannung aufgrund der Widerstandsänderung auf den Druck geschlossen werden.⁴⁸

3.2 Temperatur

Mit den Begriffen warm und kalt bezieht man sich auf eine Empfindung. Damit lässt sich jedoch nur der Wärmezustand festhalten. Mit diesen Begriffen ist es jedoch nur möglich subjektive Temperaturempfindungen festzustellen. Deshalb ist es notwendig, die Temperatur messbar zu machen.⁴⁹

„Die Temperatur ist eine physikalische Zustandsgröße.“⁵⁰

Dabei beschreibt die Temperatur den thermischen Zustand von Systemen bzw. Körpern und ist ein Maß für die Bewegungsenergie (mittlere kinetische Energie) der Moleküle eines Körpers.⁵¹ Die Temperatur wird im europäischen Raum zumeist in Grad Celsius angegeben. Weiters gibt es u.a. auch noch die Fahrenheit-Skala. Entsprechend dem internationalen Einheitensystem SI (Système international d'unités) wird die Temperatur T in der Einheit K (Kelvin) angegeben.⁵²

Für eine Temperaturskala – die Kelvin-Skala – wurden zuerst Fixpunkte definiert. Einer der ersten Fixpunkte ist der Tripelpunkt des Wassers – dieser liegt bei 273,15 K. Der zweite Fixpunkt – der Siedepunkt des Wassers – liegt bei 373,15 K. Diese Angaben beziehen sich jeweils auf einen Normluftdruck von 1013 mbar.⁵³

Der Nullpunkt der Kelvin-Skala wird auch als absoluter Nullpunkt bezeichnet. Dieser absolute Nullpunkt stellt die tiefste mögliche Temperatur dar. Diese kann jedoch nur theoretisch erreicht werden. Jene Temperatur, die sich auf den absoluten Nullpunkt bezieht, wird auch als absolute Temperatur oder thermodynamische Temperatur bezeichnet. Andere verfügbare Temperaturskalen besitzen zwar auch einen Nullpunkt, jedoch ist dieser willkürlich festgelegt worden.⁵⁴

In Tabelle 2 ist die Temperatur in Kelvin, Grad Celsius und in Grad Fahrenheit dargestellt. Die Temperatur in Grad Celsius ergibt sich dabei durch Subtraktion des Kelvin-Temperaturwertes minus 273,15. Der Temperaturwert in Grad Fahrenheit ermittelt sich aus dem Celsius-Temperaturwert multipliziert mit 9/5 und einer nachfolgenden Addition des Wertes 32.⁵⁵

⁴⁸ Vgl. Weimer (2018), Online-Quelle [20.08.2019].

⁴⁹ Vgl. Kraker-Paill (o.J.), S. 112.

⁵⁰ www.chemie.de (o.J.), Online-Quelle [20.08.2019].

⁵¹ Vgl. König/Lipp (2007), Online-Quelle [11.08.2019].

⁵² Vgl. www.lernhelfer.de (2010a), Online-Quelle [11.08.2019].

⁵³ Vgl. Kraker-Paill (o.J.), S. 112.

⁵⁴ Vgl. www.chemie.de (o.J.), Online-Quelle [20.08.2019].

⁵⁵ Vgl. www.umrechnung.org (o.J.), Online-Quelle [25.08.2019].

| Temperatur T in | | |
|-------------------|---------|---------|
| K | °C | °F |
| 0 | -273,15 | -459,67 |
| 100 | -173,15 | -279,67 |
| 150 | -123,15 | -189,67 |
| 200 | -73,15 | -99,67 |
| 250 | -23,15 | -9,67 |
| 273,15 | 0 | 32 |
| 278,15 | 5 | 41 |
| 283,15 | 10 | 50 |
| 288,15 | 15 | 59 |
| 293,15 | 20 | 68 |
| 298,15 | 25 | 77 |
| 303,15 | 30 | 86 |
| 310,15 | 37 | 98,6 |
| 323,15 | 50 | 122 |
| 348,15 | 75 | 167 |
| 373,15 | 100 | 212 |

Tabelle 2: Temperaturtabelle, Quelle: In Anlehnung an www.kukla-spedition.com (o.J.), Onlinequelle [25.08.2019].

3.2.1 Temperaturmessung

Für die Messung der Temperatur werden sogenannte Thermometer eingesetzt. Die Zahl der Arten der Thermometer und auch der Bauformen sind unzählige. Je nach Verwendungszweck und Einsatzart werden unterschiedliche physikalische Messprinzipien eingesetzt. Am häufigsten finden heute Flüssigkeitsthermometer (diese gehören zur Gruppe der Temperatursensoren mit mechanischem Ausgangssignal) und elektronische Thermometer Einsatz.⁵⁶

Entsprechend der Informationen von Gevatter werden folgende Arten von Temperatursensoren unterschieden:⁵⁷

- Temperatursensoren mit elektrischem Ausgangssignal, z. B. Thermoelemente
- Temperatursensoren mit mechanischem Ausgangssignal, z. B. Flüssigkeitsthermometer, Zeigerthermometer
- Temperatursensoren mit optischem Ausgangssignal, z. B. Lumineszenzthermometer
- Besondere Temperatursensoren, z. B. Rauschthermometer, akustische Thermometer

⁵⁶ Vgl. www.lernhelfer.de (2010c), Online-Quelle [20.08.2019].

⁵⁷ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 205 ff.

Da für diese Arbeit jedoch nur Temperatursensoren mit einem elektrischen Ausgangssignal relevant sind, wird im Folgenden nur auf eine Auswahl dieser Sensoren näher eingegangen.

3.2.2 Temperatursensoren

Nachfolgend werden einige der am häufigsten eingesetzten Temperatursensoren nach Pauritsch näher erläutert:⁵⁸

PTC-Widerstand:

Diese Widerstände werden auch als Kaltleiter bezeichnet, da sie einen positiven Temperaturkoeffizienten besitzen (PTC = Positive Temperature Coefficient). Das bedeutet, dass der Widerstand von PTC-Widerständen bei steigender Temperatur steigt. Sinkt die Temperatur, sinkt auch der Widerstandswert. Nahezu alle Metalle werden als Kaltleiter bezeichnet, da diese bei niedriger Temperatur besser leiten als bei hoher Temperatur.⁵⁹

Abbildung 13 zeigt den Widerstandsverlauf in Abhängigkeit der Temperatur eines Kaltleiters.

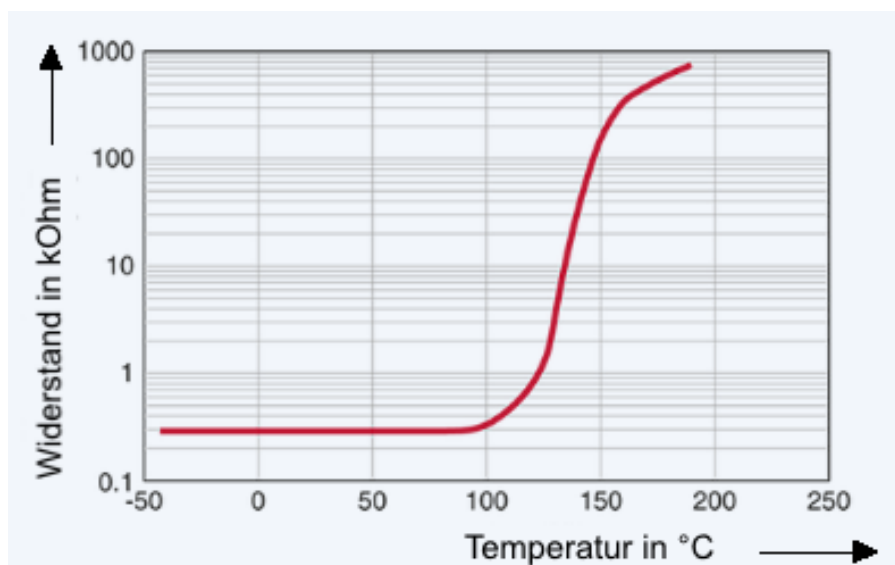


Abbildung 13: Widerstandskennlinie eines Kaltleiters, Quelle: www.tdk-electronics.tdk.com (2016), Online-Quelle [27.08.2019] (leicht modifiziert).

Zu den PTC-Widerstandssensoren gehören auch die Pt100-Widerstandstemperaturfühler. Die Bezeichnung Pt ist die Abkürzung für Platin. Der Wert 100 steht für den Widerstandwert in Ohm bei 0 °C. Die Pt100 eignen sich sehr gut für Temperaturmessungen, wobei diese üblicherweise mittels einer Konstantstromquelle betrieben werden. Durch den Spannungsabfall am Pt100 wird der Widerstandwert berechnet und als Folge die Temperatur abgeleitet. Zu beachten ist dabei jedoch, dass kein höherer Strom als max. 1 mA fließen sollte, da es ansonsten durch die Eigenerwärmung des Temperatursensors zu einem Messfehler kommen kann.⁶⁰

⁵⁸ Vgl. Pauritsch (2017), S. 65 ff.

⁵⁹ Vgl. www.elektronik-kompodium.de (2019b), Online-Quelle [27.08.2019].

⁶⁰ Vgl. www.temperaturmesstechnik.de (o.J.), Online-Quelle [27.08.2019].

NTC-Widerstand:

NTC (Negative Temperature Coefficient)-Widerstände werden auch als Heißleiter bezeichnet. Heißleiter besitzen einen negativen Temperaturkoeffizienten. Dies bedeutet, dass NTC-Widerstände ihren Widerstand bei steigender Temperatur verringern. Bei sinkender Temperatur wiederum steigt der Widerstandswert. Die genauen Widerstandswerte sind dabei aus dem jeweiligen Datenblatt zu entnehmen.⁶¹

In Abbildung 14 ist der Widerstandsverlauf eines Heißleiters in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

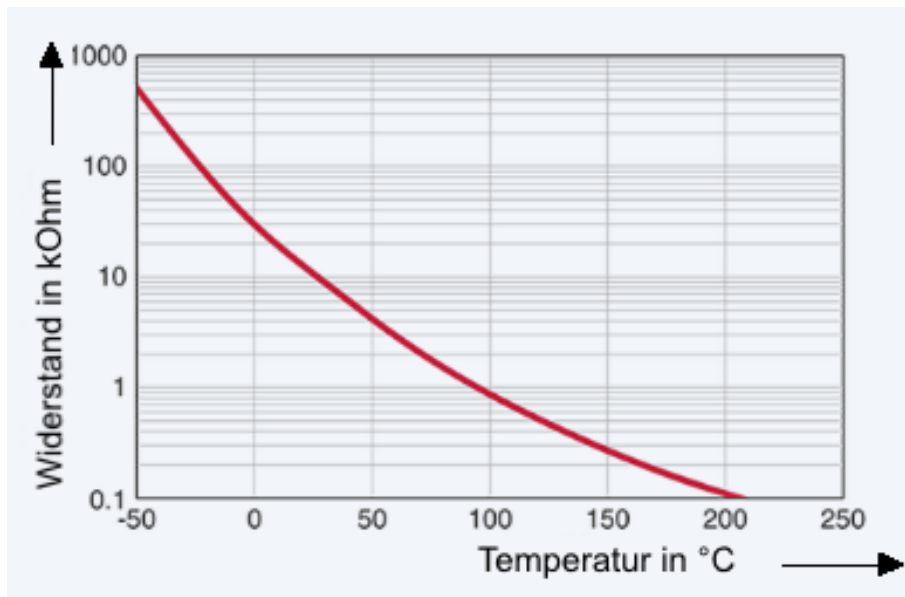


Abbildung 14: Widerstandskennlinie eines Heißleiters, Quelle: www.tdk-electronics.tdk.com (2016), Online-Quelle [27.08.2019].

Thermoelemente:

Thermoelemente nutzen die thermoelektrische Eigenschaft bei der Verwendung von zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern. Diese beiden Leiter aus unterschiedlichem Material sind an einer Stelle miteinander verbunden. Zusätzlich zu dieser Messstelle gibt es eine Vergleichsstelle. Befinden sich diese beiden Stellen auf unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 , entsteht dadurch eine Gleichspannung, die auch als Thermospannung bezeichnet wird. Diese Thermospannung U_T wird als Maß für die Temperaturdifferenz herangezogen. Abbildung 15 zeigt den Aufbau eines Thermoelements. T_1 kennzeichnet dabei die Messstelle mit unbekannter Temperatur. Die Temperaturstelle T_2 ist bekannt und wird auch als Vergleichsstelle bezeichnet.⁶²

⁶¹ Vgl. www.elektronik-kompodium.de (2019c), Online-Quelle [27.08.2019].

⁶² Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000a), S. 205 f.

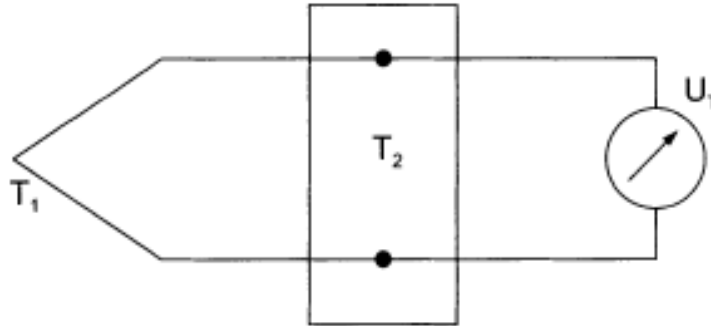


Abbildung 15: Thermoelement, Quelle: Gevatter (Hrsg.) (2000), S. 206.

3.2.3 Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur

Der physikalische Zustand von Gasen wird durch drei Größen bestimmt. Diese sind Druck, Temperatur und Volumen. Ändert man eine dieser drei Größen, werden zumeist auch die anderen beiden Größen mitverändert. Im Gegensatz zu Flüssigkeiten und Festkörpern besitzen Gase bei Temperaturerhöhung eine größere Ausdehnung des Volumens. Dieser Zusammenhang von Druck, Temperatur und Volumen wird über die Gasgesetze beschrieben. Im Folgenden werden die drei Gasgesetze für ideale Gase nach Kraker-Paill betrachtet:⁶³

Gasgesetz von Boyle-Mariotte:

Wird ein Gas auf die Hälfte des Ausgangsvolumens bei gleichbleibender Temperatur komprimiert, dann steigt auch der Druck des Gases auf das doppelte des Ausgangsdruckes. Somit gilt:

$$V \sim \frac{1}{p} \quad (3.5)$$

V/m³ Volumen

Das Gasgesetz von Boyle-Mariotte lautet wie folgt:

„Ändert man das Volumen, das ein Gas bei konstanter Temperatur einnimmt, so ändert sich der Druck derart, dass das Produkt aus Druck und Volumen stets denselben Wert liefert.“⁶⁴

$$pV = const. \quad (3.6)$$

Gasgesetz von Gay-Lussac:

Bei diesem Gasgesetz wurde der Zusammenhang von Temperatur und Volumen bei konstantem Druck untersucht. Isobar bezeichnet dabei Zustandsänderungen, bei denen der Druck konstant bleibt. Es gilt:

$$V \sim T \quad (3.7)$$

T/K Temperatur

⁶³ Vgl. Kraker-Paill (o.J.), S. 120 ff.

⁶⁴ Kraker-Paill (o.J.), S. 120.

Das Gay-Lussac Gasgesetz wird folgendermaßen beschrieben:

„Für ein ideales Gas bei konstantem Druck gilt: Das Verhältnis aus Volumen und Temperatur bleibt konstant.“⁶⁵

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad (3.8)$$

T_0/K Ausgangstemperatur

V_0/m^3 Ausgangsvolumen

Gasgesetz von Amontons:

Das dritte Gasgesetz beschreibt bei konstantem Volumen den Zusammenhang von Druck und Temperatur. Wird das Volumen bei Zustandsänderungen konstant gehalten, wird dies auch als isochor bezeichnet.

Das Gesetz von Amontons ergibt sich wie folgt:

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} = \text{const.} \quad (3.9)$$

$p_0/\text{N/m}^2$ Ausgangsdruck

Zustandsgleichung idealer Gase:

Kombiniert man die Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac können Vorgänge beschrieben werden, bei denen sich Druck, Temperatur und Volumen ändern. Dadurch ergibt sich aus den Formeln 3.5 und 3.7 folgender Zusammenhang:⁶⁶

$$V \sim \frac{T}{p} \quad (3.10)$$

$$\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2} \quad (3.11)$$

Bei eingeschlossenen Gasen hängt der Druck auch von der Temperatur ab. Erhöht sich z. B. in einem Luftballon die Temperatur, so steigt auch der Druck. Grund ist, dass sich die Teilchen schneller bewegen und häufiger zusammenstoßen. Wird die Menge an Gas durch Auslassen von Luft verringert, so sinkt auch der Druck, da es weniger Teilchen im Luftballon gibt. Wird der Ballon zusammengedrückt, so wird das Volumen verkleinert und der Druck steigt, bis der Luftballon letztendlich zerplatzt.⁶⁷

⁶⁵ Kraker-Paill (o.J.), S. 121.

⁶⁶ Vgl. Kraker-Paill (o.J.), S. 123.

⁶⁷ Vgl. www.sofatutor.at (o.J.), Online-Quelle [27.08.2019].

3.3 Drehzahl

Die Drehzahl n gibt an, wie viele Umdrehungen ein Körper oder System in einer bestimmten Zeiteinheit durchläuft. Die Einheit der Drehzahl wird in Umdrehungen pro Sekunde angegeben.⁶⁸

Sie wird aus dem Kehrwert der Umlaufdauer T berechnet. Die Umlaufdauer T gibt die Zeit an, die ein System für eine vollständige Umdrehung benötigt.⁶⁹

$$n = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

$n/1/s$ Drehzahl

T/s Umlaufzeit

Die Drehzahl steht im Zusammenhang mit der Winkelgeschwindigkeit. Diese ist folgendermaßen definiert:⁷⁰

$$\omega = 2\pi n \quad (3.13)$$

$\omega/\text{rad/s}$ Winkelgeschwindigkeit

3.3.1 Drehzahlmessung

Ein großer Teil der verfügbaren Drehzahlsensoren erfasst die Bewegung von ferromagnetischen Strukturen. Das passiert über die Veränderung des magnetischen Flusses wie z. B. bei Wellen oder Zahnrädern. Je nachdem, ob sich eine Lücke oder ein Zahn am zuständigen Sensor vorbeibewegt, wird das Magnetfeld unterschiedlich beeinflusst. Vom Sensor werden so die Änderungen des Magnetfeldes aufbereitet und als Ausgangssignal dargestellt.⁷¹

Die Messung der Drehzahl erfolgt überwiegend berührungslos. Um die Drehzahl zu ermitteln bieten sich nach Bonfig folgende Verfahren an:⁷²

- Wirbelstromdrehzahlmesser
- Stroboskop
- Tacho-Generatoren, z. B. Wirbelstromsensor, Wechselstrom-Generatoren
- Impuls-Drehzahlsensoren, z. B. passiver induktiver Sensor, kapazitiver Sensor, Hallgenerator

3.3.2 Drehzahlsensoren

Da bei dieser Arbeit die Messung der Drehzahl mittels Hallsensor passiert, wird nur auf dieses Verfahren näher eingegangen.

⁶⁸ Vgl. Kraker-Paill (o.J.), S. 27.

⁶⁹ Vgl. Hüning (2015), S. 79.

⁷⁰ Vgl. www.grund-wissen.de (2018), Online-Quelle [30.08.2019].

⁷¹ Vgl. www.rheintacho.de (2019), Online-Quelle [09.09.2019].

⁷² Vgl. Bonfig (2014), S. 775 ff.

Bei einem Hallensensor wird die Ausgangsspannung von der Richtung und Stärke des Magnetfeldes beeinflusst. Die Funktion von Hallensensoren beruht auf dem Hall-Effekt. Dieser besagt, dass die Ladungsträger durch die Lorentz-Kraft abgelenkt werden, wenn sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld befindet. Dadurch entsteht eine Spannung, die auch als Hall-Spannung bezeichnet wird.⁷³

Bei der Drehzahlmessung mittels Hallensensoren werden Bewegungen von z. B. Zahnrädern durch die Veränderung des magnetischen Flusses detektiert. Das Magnetfeld wird von einem Zahn und einer Lücke ganz unterschiedlich beeinflusst. Dadurch wird auch die Hall-Spannung des Sensors verändert. Als Ausgangssignal liefert der Hallensensor eine Rechteckspannung, welche das Magnetfeld widerspiegelt.⁷⁴

In der Praxis werden anstatt Zähnen oder Zahnrädern auch Polräder verwendet. Polräder sind ringförmig angeordnete Magnete. Auf diesem Polrad befinden sich magnetische Nord- und Südpole periodisch verteilt. Dadurch ergibt sich eine Veränderung des magnetischen Flusses, wenn sich das Polrad dreht. Abbildung 16 zeigt das Prinzip der Drehzahlmessung mittels Hallensensor. Auf dem dargestellten Mikrocontroller sind zwei Hallensensoren integriert, welche die Magnetfeldänderung aufnehmen und als digitales Signal wiedergeben. In dem dargestellten Fall erfolgt eine differentielle Erfassung, welche eventuell auftretende Störungen erfasst, aber durch die Gleichtaktsignale wieder unterdrückt.⁷⁵

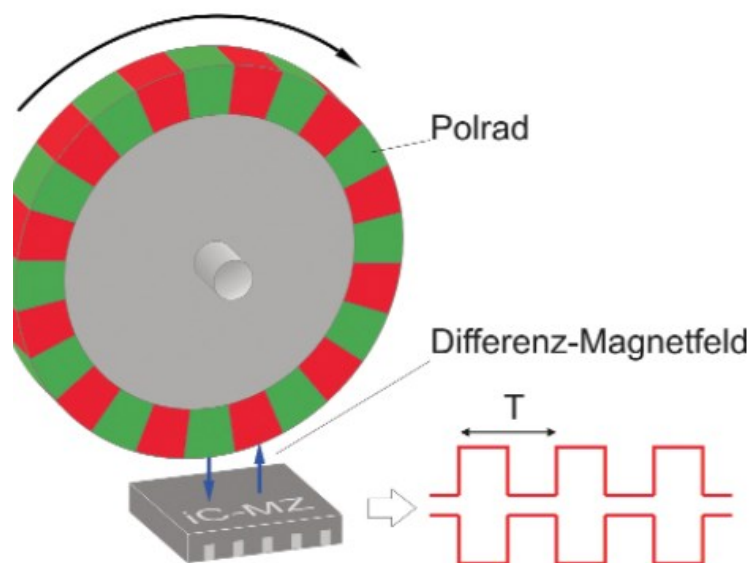


Abbildung 16: Drehzahlmessung mittels Hallensensor, Quelle: Lin (2008), Online-Quelle [09.09.2019].

Durch eine anschließende Frequenzmessung des digitalen Signals kann auf die Drehzahl, z. B. eines Motors geschlossen werden.⁷⁶

⁷³ Vgl. kompendium.infotip.de (2018), Online-Quelle [09.09.2019].

⁷⁴ Vgl. www.rheintacho.de (2019), Online-Quelle [09.09.2019].

⁷⁵ Vgl. Lin (2008), Online-Quelle [09.09.2019].

⁷⁶ Vgl. Hüning (2015), S. 82 f.

4 REGLER

Regler haben allgemein die Aufgabe, eine bestimmte, je nach Anwendung variierende, physikalische Größe auf einen vorgegebenen Sollwert zu bringen. Zusätzlich soll diese physikalische Größe auf dem vorgegebenen Sollwert gehalten werden. Gegen auftretende Störgrößen muss der Regler in geeigneter Weise entgegenwirken. Als Beispiel kann die Bohrmaschine mittels elektronischer Drehzahlregelung angegeben werden. Unterschiedliche Belastungen beim Bohren, z. B. bedingt durch den Werkstoff, wirken als Störgröße auf die Bohrmaschine, wodurch diese die auftretenden Drehzahlschwankungen korrigieren muss. Durch permanente Weiterentwicklung der Technik ist eine Beeinflussung von technischen Eigenschaften durch regelnde Eingriffe möglich. Ziel dabei ist das Erreichen eines stabilen Systemzustandes, bei dem keine unerwünschten Schwingungen auftreten.⁷⁷

4.1 Steuerung – Regelung

Im Folgenden werden die Begriffe Steuerung und Regelung näher erläutert:

4.1.1 Steuerung

Entsprechend den Angaben von Heinrich und Schneider ist in der DIN IEC 60050-351 für eine Steuerung folgendes festgehalten:

„Die Steuerung ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeit beeinflussen.“⁷⁸

Eine Steuerung ist dadurch gekennzeichnet, dass sie einen offenen Wirkungsweg aufweist, bei dem die durch die Eingangsgröße beeinflusste Ausgangsgröße nicht ständig auf sich selbst einwirkt.⁷⁹

In Abbildung 17 ist schematisch die Steuerung der Raumtemperatur ϑ_R dargestellt. In dieser Abbildung wird dem Steuergerät mittels eines Temperaturfühlers die Außentemperatur ϑ_A sowie auch der Sollwert ϑ_S der Raumtemperatur entsprechend vorgegeben. Das Steuergerät hat dabei die Aufgabe, die Durchflussmenge des Heizwassers im Heizungskreislauf über den Motor und das darauffolgende Ventil zu verstellen. Durch bestimmte Kennlinien oder Algorithmen ist der Zusammenhang zwischen ϑ_A und ϑ_S abgelegt. Dadurch wird auf eine Änderung von ϑ_A und/oder ϑ_S reagiert. Jedoch gibt es hier keinen Vergleich mit der tatsächlich im Raum vorherrschenden Temperatur.⁸⁰

⁷⁷ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000b), S. 36.

⁷⁸ Heinrich/Schneider (Hrsg.) (2019), S. 2.

⁷⁹ Vgl. Heinrich/Schneider (Hrsg.) (2019), S. 2.

⁸⁰ Vgl. Traussnigg (2010), S. 1.

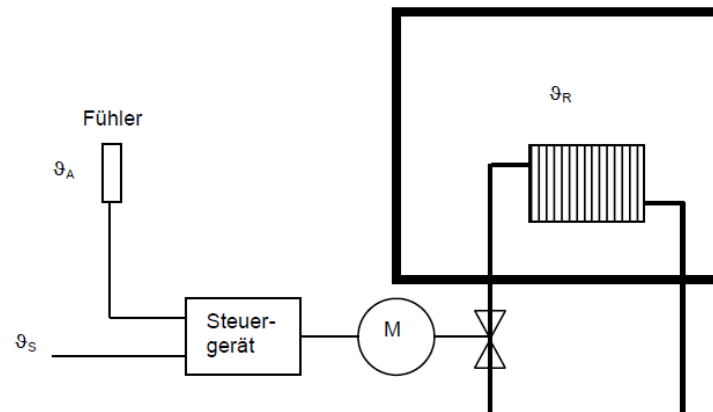


Abbildung 17: Steuerung der Raumtemperatur, Quelle: Traussnigg (2010), S. 1.

Kommt es zu einer Veränderung von Systemparametern oder aber zum Vorschein von Störgrößen, ist der Nachteil einer Steuerung deutlich sichtbar. Angenommen, im Raum wird, wie in Abbildung 18 dargestellt, eine Tür oder ein Fenster geöffnet, kann die Raumtemperatur je nach Temperatur im Außenbereich absinken oder aber auch ansteigen. Die zuständige Steuerung erhält in diesem Fall keine Information über diese Veränderung und kann dadurch nicht in das System eingreifen. Bei einer Steuerung werden Veränderungen von Störgrößen nicht vom System erkannt und dadurch kann auch nicht darauf reagiert werden.⁸¹

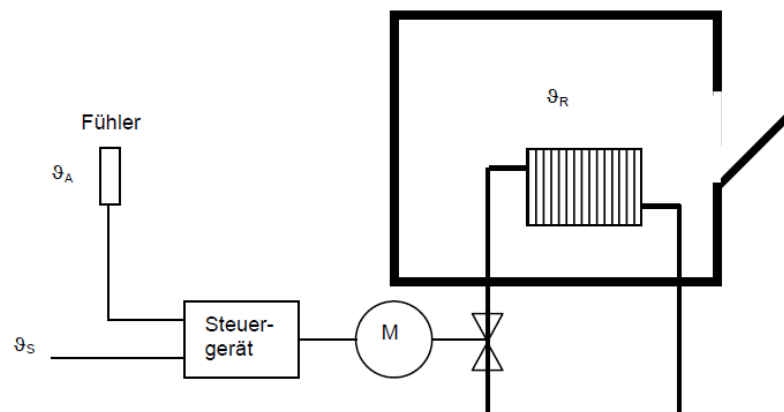


Abbildung 18: Steuerung der Raumtemperatur unter Berücksichtigung einer Störgröße, Quelle: Traussnigg (2010), S. 2.

4.1.2 Regelung

Für eine Regelung ist nach Angaben von Heinrich und Schneider in der DIN IEC 60050-351 Nachfolgendes enthalten:

⁸¹ Vgl. Traussnigg (2010), S. 2.

„Die Regelung ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“⁸²

Eine Regelung ist durch einen geschlossenen Wirkungsablauf gekennzeichnet, bei dem die Regelgröße des Regelkreises ständig sich selbst beeinflusst.⁸³

Abbildung 19 stellt den Hauptunterschied zu einer Steuerung dar. In dieser Abbildung wird die gemessene Raumtemperatur ϑ_R nun mit dem vorgegebenen Sollwert ϑ_S verglichen. Je nach Ergebnis dieses Vergleiches wird die Durchflussmenge des Heizwassers im Heizkreislauf über den Motor und das Ventil beeinflusst. Da die Raumtemperatur gemessen und wieder zum Regler zurückgeführt wird, wird hier von einer Rückführung gesprochen.⁸⁴

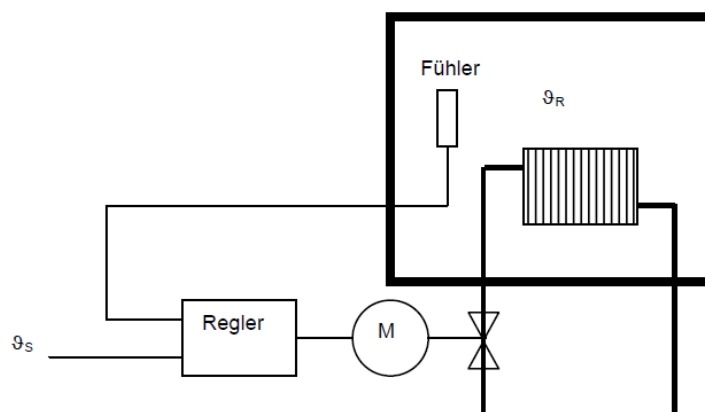


Abbildung 19: Regelung der Raumtemperatur, Quelle: Traussnigg (2010), S. 3.

Der Vorteil einer Regelung liegt darin, dass das System Veränderungen von Systemparametern oder das Aufkommen von Störgrößen erkennt und darauf reagieren kann. Abbildung 20 zeigt den Raum mit einer geöffneten Tür oder einem Fenster. Dadurch kann sich eine Abweichung der im Raum gemessenen Raumtemperatur ϑ_R zum vorgegebenen Sollwert ϑ_S ergeben. Da diese Abweichung vom Regler bemerkt wird, kann dieser entsprechend reagieren und auf den Motor und das Ventil einwirken, bis die Raumtemperatur ϑ_R wieder an den Sollwert ϑ_S angeglichen ist. Dadurch können bei einer Regelung Störungen erkannt und diesen entsprechend entgegengewirkt werden.⁸⁵

⁸² Heinrich/Schneider (Hrsg.) (2019), S. 4.

⁸³ Vgl. Heinrich/Schneider (Hrsg.) (2019), S. 4.

⁸⁴ Vgl. Traussnigg (2010), S. 2.

⁸⁵ Vgl. Traussnigg (2010), S. 3.

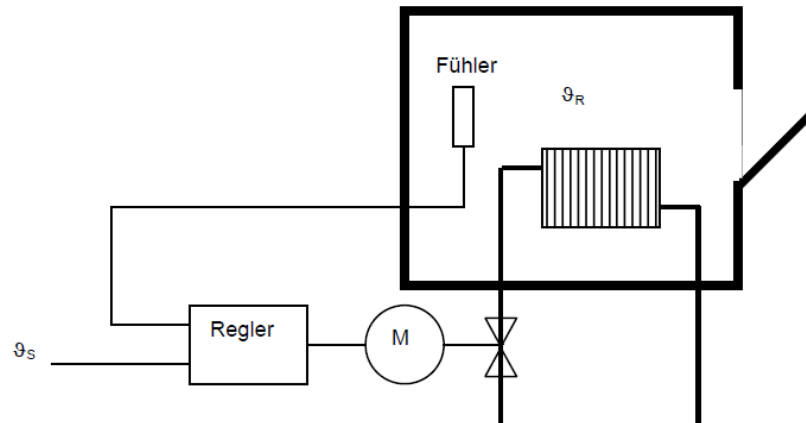


Abbildung 20: Regelung der Raumtemperatur unter Berücksichtigung einer Störgröße, Quelle: Traussnigg (2010), S. 3.

4.2 Grundstruktur eines Regelkreises

Abbildung 21 zeigt die allgemeine Grundstruktur eines Regelkreises, wie sie auch in den meisten theoretischen Untersuchungen vorkommt. Ein Merkmal ist dabei die negative Rückkopplung der Ausgangsgröße y . Diese ist notwendig, um die Regelabweichung e zu bilden und um dadurch den Regelkreis zu schließen. Die Regelabweichung e ergibt sich dabei aus der Subtraktion von der Führungsgröße w und der Ausgangsgröße y . In der Abbildung stellen weiters u die Stellgröße, z die Störgröße sowie G_R den Regler und G_S die Strecke dar.⁸⁶

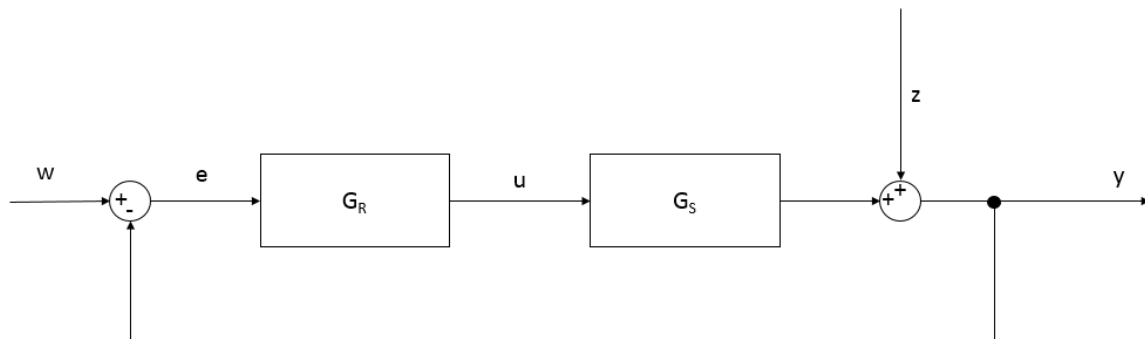


Abbildung 21: Grundstruktur eines Regelkreises, Quelle: Traussnigg (2010), S. 22 (leicht modifiziert).

4.3 PID-Regler

PID-Regler sind Reglertypen, welche heutzutage in der Praxis am häufigsten eingesetzt werden.⁸⁷

Der PID-Regler setzt sich dabei aus einer Parallelschaltung der drei Grundformen des P-, I- und D-Gliedes zusammen. Das P-Glied bezeichnet dabei ein proportional wirkendes Übertragungssystem, das I-Glied ein integrierend wirkendes und das D-Glied ein differenzierend wirkendes Übertragungssystem. Abbildung 22

⁸⁶ Vgl. Traussnigg (2010), S. 21 f.

⁸⁷ Vgl. Draxler (2010), Online-Quelle [15.10.2019].

zeigt das Blockschaltbild eines PID-Reglers mit den drei Grundformen. KP, KI und KD stellen dabei die Parameter des entsprechenden Systems dar.⁸⁸

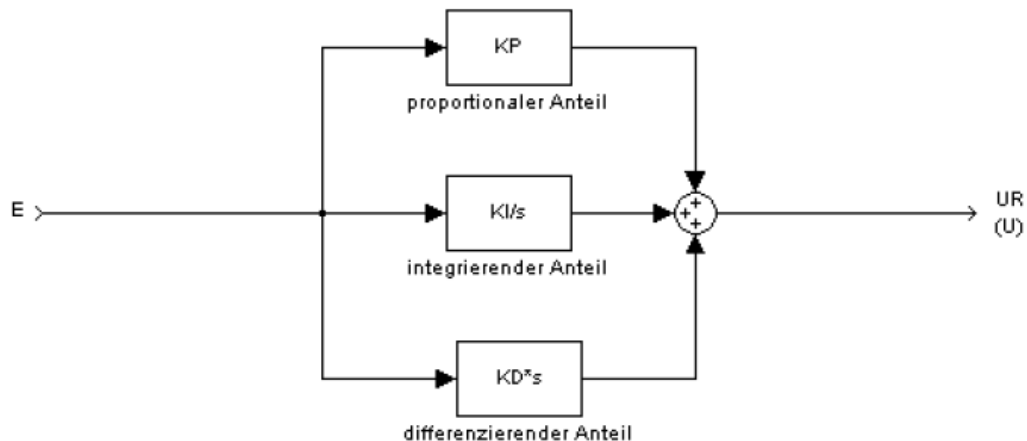


Abbildung 22: Blockschaltbild eines PID-Reglers, Quelle: Traussnigg (2010), S. 31.

Aus der oben gezeigten Abbildung wird die Übertragungsfunktion des PID-Reglers wie folgt ermittelt:⁸⁹

$$\begin{aligned}
 G_{PID}(s) = G_R(s) &= \frac{UR(s)}{E(s)} = KP + \frac{KI}{s} + KDs = \\
 &= KP \left(1 + \frac{KI}{KP s} + \frac{KDs}{KP} \right) = \\
 &= KR \left(1 + \frac{1}{TIs} + TDs \right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Der Verstärkungsfaktor KR, die Integralzeit TI und die Differentialzeit TD ergeben sich dabei wie folgt und werden auch als Einstellwerte des Reglers bezeichnet:⁹⁰

$$\begin{aligned}
 KR &= KP \\
 TI &= \frac{KP}{KI} \\
 TD &= \frac{KD}{KP}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

PID-Regler vereinen Eigenschaften von PD- und PI-Reglern, indem sie ein geringes maximales Überschwingen und keine bleibende Regelabweichung als Merkmale bzw. Vorteile aufweisen.⁹¹

⁸⁸ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000b), S. 39 f.

⁸⁹ Vgl. Traussnigg (2010), S. 31.

⁹⁰ Vgl. Traussnigg (2010), S. 33.

⁹¹ Vgl. Gevatter (Hrsg.) (2000b), S. 40.

5 KONZEPT DES PROTOTYPS

Für den Prototyp des RDK-Prüfstandes soll eine geeignete Möglichkeit gefunden werden, um direkte RDK-Systeme absichern zu können. Dabei soll es möglich sein, die Temperatur und den Druck einfach zu steuern und die RDK-Sensoren in Bewegung zu versetzen. Nachfolgend sind die Vorgaben und das Konzept für den Prototyp festgehalten:

5.1 Vorgaben

Um ein Konzept für den Prototyp zu entwickeln, ist es notwendig Vorgaben für diesen zu definieren. Als Hauptfunktion wurde das Einstellen der Temperatur und auch des Druckes festgelegt. Es muss dabei beachtet werden, dass Temperatur und Druck auch unabhängig voneinander eingestellt werden können. Folgende Vorgaben sind für den Prototyp-Prüfstand festgelegt:

- Einstellen der Temperatur:
 - Temperaturbereich von 20 °C bis max. 100 °C, wobei der Einsatzbereich bei max. 90 °C liegt; Der Temperaturbereich von -30 °C bis 20 °C wird durch Fahrzeugerprobungen abgedeckt
 - Bei der Verwendung einer Heizung darf diese mit einer Spannung von max. 12 V betrieben werden → Unternehmensinterne Vorgabe bezüglich Sicherheit
 - Die Genauigkeit der Temperatur wird mit ± 1 °C festgelegt
 - Die Temperatur soll in °C angegeben bzw. angezeigt werden
- Einstellen des Druckes:
 - Druckbereich von 0 bar bis max. 5 bar, wobei der Einsatzbereich bei max. 3,5 bar liegt
 - Die Genauigkeit des Druckes wird mit $\pm 0,1$ bar festgelegt
 - Der Druck soll in Bar angegeben bzw. angezeigt werden
- Möglichkeit zum schnellen Austausch der RDK-Sensoren (einfacher mechanischer Zugang zu den RDK-Sensoren)
- Die RDK-Sensoren müssen zum Übertragen wesentlicher Informationen in Bewegung versetzt werden können → Einstellen der Drehzahl
- Positionierung des RDK-Steuergerätes außerhalb der Druck- und Temperaturumgebung der RDK-Sensoren
- Gewährleistung der Funkübertragung von den RDK-Sensoren zum zentralen Steuergerät
- Versorgung der Komponenten mit einer Spannung von 12 V

Zusätzlich soll der Prüfstand mittels einer graphischen Benutzeroberfläche bedient und angesteuert werden können. Dabei sollen der Druck, die Temperatur und auch die Drehzahl der RDK-Sensoren eingestellt bzw. vorgegeben werden können.

5.2 Konzept

Für den Prototyp wird ein Konzept mittels Druckkammer festgelegt. Diese Druckkammer besitzt einen Deckel, wodurch es einfach möglich ist die RDK-Sensoren, z. B. für Testzwecke, auszutauschen. Mittels des Einsatzes von Magnetventilen beim Lufteinlass kann der Druck in diesem Gehäuse aufgebaut werden. Genauso kommt ein Magnetventil für den Luftauslass zum Einsatz, um Druck abzubauen.

Zusätzlich wird ein zweiter Luftauslass konzipiert, welcher mittels eines Kugelhahns manuell bedient wird. Als Ergänzung wird an diesem Luftauslass auch ein Manometer installiert, um den Druck zu überwachen. Der Kugelhahn bietet die Möglichkeit, den Druck in der Druckkammer manuell zu reduzieren bzw. abzulassen. Diese Funktion wird nicht nur in der Testphase eingebaut, sondern ist als fixer Bestandteil des Prüfstandes zum Schutz vor bzw. bei einem Fehlverhalten entwickelt.

Damit der vorherrschende Druck in der Druckkammer permanent gemessen werden kann, kommt ein Drucksensor zum Einsatz.

Um die Temperatur im Inneren des Gehäuses anzuzeigen und zu messen, wird ein Temperatursensor verbaut.

RDK-Sensoren benötigen zum Übertragen der entsprechenden Informationen an das zentrale RDK-Steuergerät eine Beschleunigung. Um diese zu realisieren, wird in der Druckkammer ein Motor verbaut, bei dem die Drehzahl vorgegeben bzw. eingestellt werden kann. Da es beim Verbau von nur einem RDK-Sensor zu einer Unwucht durch die ungleiche Belastung kommen kann, wird auf dem Rotor des Motors zusätzlich ein zweiter RDK-Sensor verbaut.

Um die Vorgaben zu erfüllen, wird auch eine Heizung bzw. Heizmatte in der Druckkammer berücksichtigt.

Für die Ansteuerung des Motors sowie der Heizmatte ist es notwendig, einen Kabelauslass zu integrieren. Dieser Auslass wird, nachdem die Anzahl der elektrischen Leitungen definiert ist, vergossen. Dadurch kann über den Kabelauslass keine Luft entweichen.

Abbildung 23 zeigt das Konzept der Druckkammer für den RDK-Prüfstand. In dieser Darstellung sind alle notwendigen Konzeptüberlegungen wie Druck- und Temperatursensor, Lufteinlass- und -auslassventil, Kabelauslass sowie die Heizmatte und auch der Motor inklusive der RDK-Sensoren ersichtlich. Das zentrale RDK-Steuergerät befindet sich dabei außerhalb der Druckkammer und ist in dieser Abbildung nicht dargestellt.

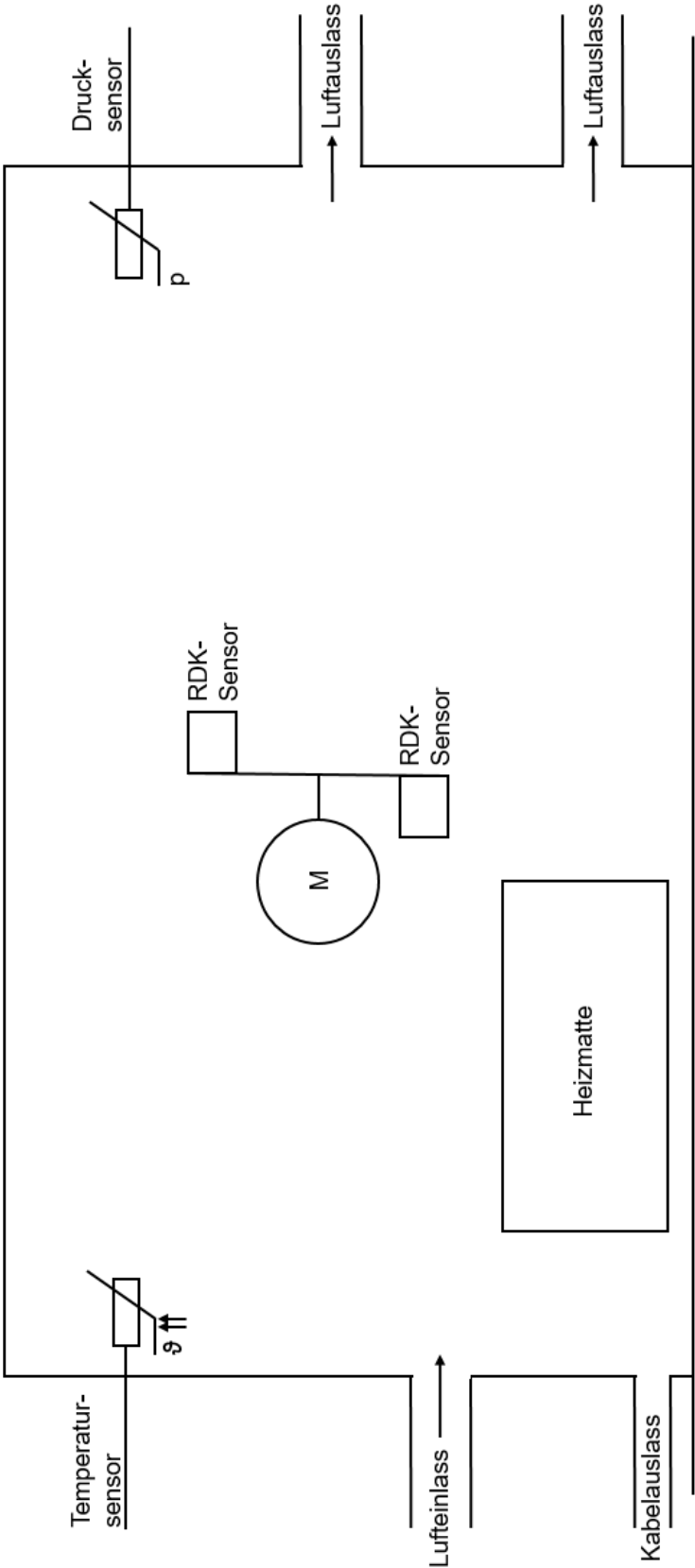


Abbildung 23: Konzept der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

6 AUSWAHL DER KOMPONENTEN

Nachfolgend werden die Komponenten, entsprechend der Vorgaben und dem Konzept, welche in Kapitel 5 angegeben sind, ausgewählt. Dabei wird jeweils die für den Prüfstand ausgewählte Komponente beschrieben.

6.1 Sensoren

6.1.1 Temperatursensor und Messumformer

Für die Messung, Kontrolle und Überwachung der Temperatur empfiehlt sich für diese Anwendung ein Pt100-Temperatursensor. Wie im Abschnitt 3.2.2 erwähnt, zählt der Pt100-Widerstandstemperturfühler zu den PTC-Widerständen und weist einen positiven Temperaturkoeffizienten auf.

Aufgrund der zu erwartenden Betriebstemperaturen des Prüfstandes von bis zu 90 °C fällt die Entscheidung des Temperatursensors auf einen Pt100-Widerstandstemperturfühler der Marke RS-Components. Die Daten dieses Sensors, wie der Sensortyp, die Genauigkeitsklasse, der Temperaturbereich und auch der Anschlusstyp sind in Tabelle 3 dargestellt:

| | |
|--------------------|---|
| Sensortyp | Pt100 (100 Ohm bei 0 °C, gemäß IEC 751) |
| Genauigkeitsklasse | Klasse B |
| Temperaturbereich | -50 °C bis +250 °C |
| Anschlusstyp | 2-Leiter |

Tabelle 3: Daten des Pt100-Widerstandsthermometers, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Pt100 – RS Online (o.J.), Online-Quelle [15.10.2019].

Bei einem 2-Leiter-Widerstandstemperturfühler ist die größte Problematik durch den Aufbau bedingt. Sind z. B. die Anschlussleitungen mehrere Meter lang, hat der Eigenwiderstand der Anschlussleitungen einen direkten Einfluss auf die Messung. Dadurch kann es zu einer Verfälschung des Ergebnisses kommen. Als Richtwert werden häufig ca. 0,4 K pro Meter Anschlussleitung gemessen.⁹²

Entsprechend den Angaben von www.electronic.sensor.de entspricht die Genauigkeitsklasse B des Pt100 folgenden Grenzabweichungen:⁹³

$$\Delta T = \pm 0,3 + 0,005|T| \quad (6.1)$$

⁹² Vgl. Gibietz (o.J.), Online-Quelle [15.10.2019].

⁹³ Vgl. www.electronic.sensor.de (2011), Online-Quelle [15.10.2019].

Daraus ergibt sich bei der maximalen Betriebstemperatur T von 90 °C , auf die der Prüfstand aufgeheizt werden soll, nach Formel 6.1 eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = \pm 0,75\text{ °C}$. Diese maximale Abweichung ist für den Einsatz des Prüfstandes akzeptabel.

Ein weiteres Entscheidungskriterium für den Einsatz des ausgewählten Sensors ist die Möglichkeit der praktischen Verschraubung des Pt100-Widerstandstemperturfühlers.

Abbildung 24 zeigt den ausgewählten Pt100-Widerstandstemperturfühler inklusive der 2-Leiter-Anschlussleitung.



Abbildung 24: Pt100-Widerstandstemperturfühler, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

Da der Pt100-Widerstandstemperturfühler einen Widerstandswert und keinen Spannungswert, welcher aber für die allermeiste Verarbeitungshardware benötigt wird, als Ausgangsgröße liefert, wird für die Umwandlung in eine Ausgangsspannung ein Messumformer eingesetzt. Zusätzlich zu dieser Umformung können Messumformer Sensorsignale auch verstärken und linearisieren. In Abbildung 25 ist das Prinzip der Verbindung zwischen dem Pt100-Widerstandstemperturfühler und dem Messumformer dargestellt.⁹⁴

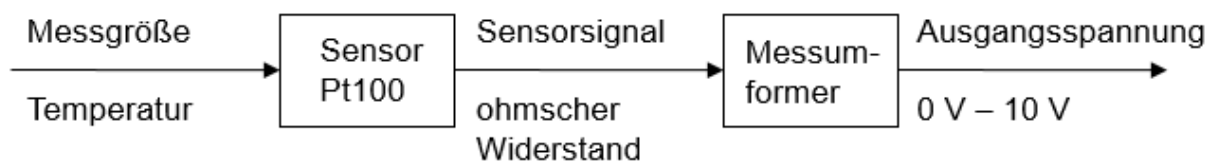


Abbildung 25: Verbindung Pt100 zu Messumformer, Quelle: In Anlehnung an www.hm.edu (o.J.), Online-Quelle [21.10.2019].

Für die Umformung des Pt100-Signals in eine analoge Ausgangsspannung von 0 V bis 10 V wurde der Temperatur-Messumformer der Marke Enda mit der Bezeichnung MU-PT100-UO10-0/200 ausgewählt. Dieser Messumformer verfügt über einen Temperaturbereich, der wesentlich höher ist als die Vorgabe. Dieser höhere Bereich wurde gewählt, um bei Bedarf und zur Sicherheit auch höhere Temperaturen als in der Vorgabe zu messen.

⁹⁴ Vgl. www.hm.edu (o.J.), Online-Quelle [21.10.2019].

Die wesentlichen Daten des Temperatur-Messumformers sind in Tabelle 4 dargestellt. Aus dieser Tabelle kann die Versorgungsspannung, das Eingangssignal, das Ausgangssignal und der Bereich der analogen Ausgangsspannung sowie der Temperaturbereich des Messumformers entnommen werden.

| | |
|--------------------------|------------------|
| Versorgungsspannung | 12 V bis 35 V |
| Eingangssignal | Pt100 |
| Ausgangssignal | Analog |
| Analoge Ausgangsspannung | 0 V bis 10 V |
| Temperaturbereich | 0 °C bis +200 °C |

Tabelle 4: Daten des Messumformers, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Messumformer – Conrad (2014), Online-Quelle [21.10.2019].

Der ausgewählte Temperatur-Messumformer ist in Abbildung 26 ersichtlich.



Abbildung 26: Messumformer, Quelle: www.conrad.at (o.J.), Online-Quelle [21.10.2019].

6.1.2 Drucksensor

Um den vorherrschenden Druck permanent überwachen zu können, wird ein Drucksensor der Serie 3100 von der Firma Gems Sensors ausgewählt. Dieser ausgewählte Drucksensor besitzt einen Temperaturbereich, der zu den erwartenden Betriebstemperaturen des Prüfstandes passt. Der Messbereich dieses Drucksensors kann den notwendigen Druckbereich, welcher für den Prüfstand benötigt wird, abdecken. Des Weiteren liefert dieser Drucksensor ein analoges Ausgangssignal, das in Form einer analogen Ausgangsspannung von 0 V bis 10 V ausgegeben wird.

Tabelle 5 zeigt die Daten des Drucksensors. In dieser Abbildung sind der Sensortyp, das zu messende Medium, der Temperatur- und Druckbereich, der Ausgangstyp, der analoge Ausgangsspannungsbereich sowie auch die Versorgungsspannung und die Genauigkeit ersichtlich. Die Funktionsweise der Dünnschicht-Druckaufnehmereinheit ist dem Abschnitt 3.1.2 zu entnehmen.

| | |
|---------------------|-----------------------------------|
| Sensortyp | Dünnschicht-Druckaufnehmereinheit |
| Medium | Luft |
| Temperaturbereich | -40 °C bis +125 °C |
| Druckbereich | 0 bar bis 10 bar |
| Ausgangstyp | Analog |
| Analog-Ausgang | 0 V bis 10 V |
| Versorgungsspannung | 8 V bis 30 V DC |
| Genauigkeit | 0,25 % FS |

Tabelle 5: Daten des Drucksensors, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Drucksensor – Gems Sensors (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

Dieser gewählte Drucksensor misst den Relativdruck. D.h. der gemessene Druck wird auf den atmosphärischen Luftdruck bezogen. Siehe dazu auch Abschnitt 3.1.1.

Die Angabe der Genauigkeit von 0,25 % FS (Full Scale) bedeutet, dass sich die Abweichung auf den Endwert bezieht.⁹⁵ Bei dem verwendeten Drucksensor beträgt die Abweichung somit $\pm 0,025$ bar.

Aus dem angegebenen Druckbereich sowie der Angabe der analogen Ausgangsspannung lässt sich ableiten, dass eine gemessene Spannung von 1 V gleich einem Druck von 1 bar entspricht.

In Abbildung 27 ist der eingesetzte Drucksensor von Gems Sensors dargestellt.

⁹⁵ Vgl. www.massflow-online.com (2019), Online-Quelle [16.10.2019].



Abbildung 27: Gems Drucksensor, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

6.2 Antrieb

Wie im Abschnitt 2.2.2 erläutert, ist es für die RDK-Sensoren notwendig, dass diese eine Beschleunigung erfahren, um die notwendigen Daten an das RDK-Steuergerät zu übertragen. Für die Erzeugung dieser Bewegung kommen nachfolgende Komponenten der Firma Faulhaber zum Einsatz.

6.2.1 Motor

Als Motor wird der DC-Flachmotor der Serie 3216 BXT R gewählt. Dieser Motor bietet die Möglichkeit, die Drehzahl fix einzustellen oder über eine analoge Sollwertvorgabe regeln zu können. Weiters kann die aktuelle Drehzahl des Motors mittels der integrierten Hallsensoren ausgelesen werden.

Da der Motor auch den Betriebstemperaturen des Prüfstandes ausgesetzt ist, ist auch der Temperaturbereich ein entscheidendes Auswahlkriterium. Weiters sind es die geringen Abmessungen, z. B. des Durchmessers von ca. 30 mm, und die benötigte Nennspannung des Motors, die zur Auswahl dieser Komponente beitragen.

In Tabelle 6 sind die Nennspannung, der Temperaturbereich, die Drehrichtung sowie auch die maximale Drehzahl und die Verfügbarkeit von Hallsensoren des Motors angegeben.

| | |
|-------------------|---------------------|
| Nennspannung | 12 V |
| Temperaturbereich | -40 °C bis +100 °C |
| Drehrichtung | je nach Ansteuerung |
| Maximale Drehzahl | 10.000 1/min |
| Hallsensoren | Ja, 3 Stück digital |

Tabelle 6: Daten des Servomotors, Quelle: In Anlehnung an Faulhaber (2019a), Online-Quelle [16.10.2019].

Abbildung 28 zeigt den eingesetzten DC-Flachmotor inklusive der Anschlussleitungen der Firma Faulhaber.



Abbildung 28: Faulhaber DC-Flachmotor, Quelle: www.faulhaber.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

6.2.2 Speed Controller

Für den oben genannten Motor kommt außerdem ein sogenannter Speed Controller der Serie SC 2804 S inklusive Programmieradapter zum Einsatz. Da diese beiden Komponenten außerhalb des Prüfstandes positioniert sind, ist der Temperaturbereich in diesem Fall irrelevant.

Durch die Kombination dieser Komponenten ist es möglich, z. B. Betriebsarten sowie auch Sollwertvorgaben zu verändern.⁹⁶

Mit Hilfe der von Faulhaber bereitgestellten Software namens Motion Manager für den Motor, den Speed Controller und den Programmieradapter, kann der Antrieb u.a. so eingestellt werden, dass die Drehzahl mittels analoger Sollwertvorgabe eingestellt werden kann.

Die Kennlinie in Abbildung 29 gibt die lineare Kennlinie des Antriebes zur Ermittlung der analogen Sollwertvorgabe bzw. des Spannungswertes zum Einstellen der Drehzahl wieder. In dieser Abbildung ist die Drehzahl in 1/min angegeben, da dadurch die Umrechnung auf den Spannungswert vereinfacht wird. Wie aus Tabelle 6 zu entnehmen ist, liegt die maximale Drehzahl des Antriebes bei 10.000 1/min.

⁹⁶ Vgl. Faulhaber (2019b), Online-Quelle [16.10.2019].

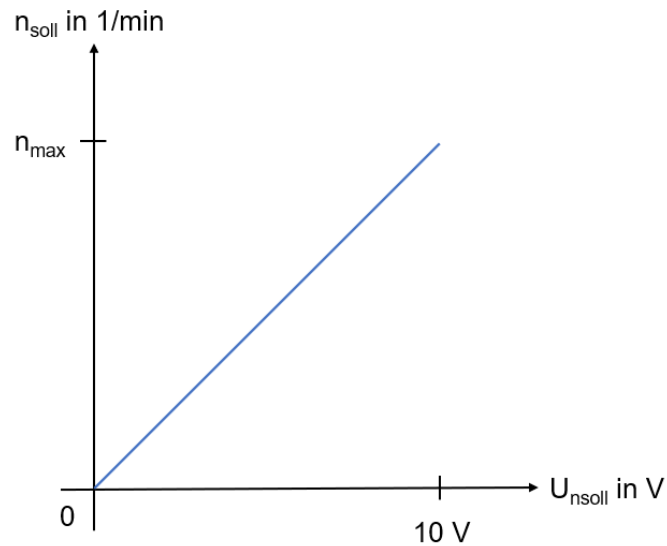


Abbildung 29: Kennlinie für die Sollwertvorgabe, Quelle: In Anlehnung an Faulhaber (Hrsg.) (2019), S. 43.

In Abbildung 30 ist auf der linken Seite der Programmieradapter und auf der rechten Seite der Speed Controller SC 2804 S ersichtlich.

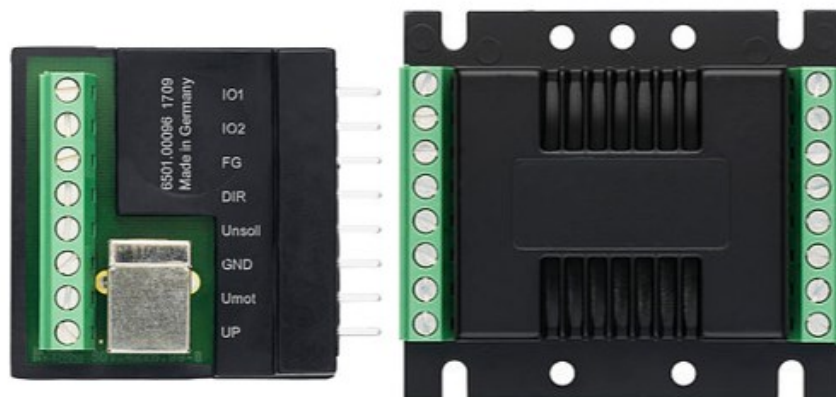


Abbildung 30: Programmieradapter und Speed Controller, Quelle: www.faulhaber.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

6.3 Magnetventile

Die Magnetventile werden einerseits als Einlassventil und andererseits als Auslassventil benötigt. Dadurch wird Druck aufgebaut, aber auch reduziert. Ausgewählt wurden Magnetventile der Serie VX21 von der Firma SMC.

Die Daten der eingesetzten Magnetventile, wie Versorgungsspannung, Anzahl der Luftanschlüsse, Ventilposition und der Einsatzbereich, werden in Tabelle 7 gezeigt.

| | |
|---------------------------|---------------------|
| Versorgungsspannung | 12 V |
| Anzahl der Luftanschlüsse | 2, mit Innengewinde |
| Ventilposition Standard | geschlossen |
| Einsatzbereich | Luft |

Tabelle 7: Daten der Magnetventile, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Magnetventil – RS Online (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

Abbildung 31 zeigt das ausgewählte Magnetventil.



Abbildung 31: Magnetventil, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019].

6.4 Heizmatte

Um beim Prüfstand die Temperatur zu verändern bzw. zu heizen, wird eine Heizmatte eingesetzt. Diese besitzt eine Versorgungsspannung von 12 V sowie eine Leistung von 60 W. Diese Daten inklusive der Spitzen-Temperatur der Heizmatte sowie die Abmessungen sind in Tabelle 8 dargestellt.

| | |
|---------------------|--------------|
| Versorgungsspannung | 12 V |
| Leistung | 60 W |
| Spitzen-Temperatur | +300 °C |
| Abmessungen | 200 x 300 mm |

Tabelle 8: Daten der Heizmatte, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Heizmatte – RS Online (o.J.), Online-Quelle [17.10.2019].

Bei dem Einsatz von Bauteilen mit z. B. einer Spannungsversorgung von über 24 V für Prüfstände, ist es im Unternehmen vorgeschrieben, eine spezielle Schulung und Sicherheitsunterweisung vorweisen zu können. Um den Bedarf der Schulung und Sicherheitsunterweisung zu umgehen und die Vorgaben einzuhalten, wurde diese Heizmatte mit 12 V Spannungsversorgung ausgewählt.

Abbildung 32 zeigt die Heizmatte für den Prüfstand.



Abbildung 32: Heizmatte, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [18.10.2019].

6.5 Software für die Ansteuerung

Um die verwendeten Komponenten anzusteuern und die entsprechenden Daten zu verarbeiten sowie eine grafische Bedienoberfläche zu erstellen, wird die Software LabVIEW von der Firma National Instruments eingesetzt.

Im Nachfolgenden werden die Software LabVIEW und die I/O (Input/Output)-Schnittstellen erläutert:

6.5.1 LabVIEW

Die Software LabVIEW ist eine grafische Entwicklungsumgebung. Durch dieses Programm ist es möglich, dass jegliche Anwendungen, wie z. B. eine Messdatenanalyse, eine Hardwarekonfiguration oder auch die Fehlersuche, grafisch dargestellt werden können.⁹⁷

Häufig findet LabVIEW Anwendung bei der Entwicklung von Steuer-, Regel-, Mess- und Prüfanwendungen. Für die Programmierung werden selbst erstellte oder vorgefertigte grafische Symbole in einem Blockdiagramm entsprechend der Anforderung verkabelt. Der dadurch entstandene Programmcode wird von LabVIEW direkt in einen Maschinencode kompiliert. Der Maschinencode kann direkt auf dem Prozessor des jeweiligen Computers ausgeführt werden. Wie bei den meisten Programmiersprachen ist es auch mit LabVIEW möglich Schleifen, verschiedene Datentypen oder Variablen zu verwenden. Abbildung 33 zeigt die grafische Darstellung einer While-Schleife im Blockdiagramm. Diese Schleife wird solange ausgeführt, bis die Stopp-Bedingung erfüllt ist oder der Stopp-Knopf gedrückt wird.⁹⁸

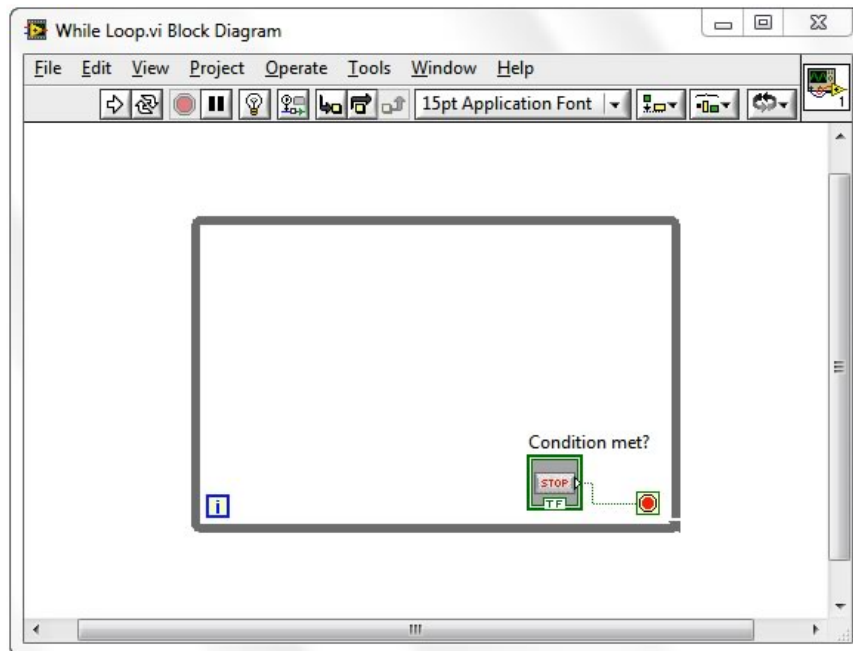


Abbildung 33: While-Schleife im Blockdiagramm, Quelle: www.ni.com (2019c), Online-Quelle [18.10.2019].

Die Software ist datenflussgesteuert, was bedeutet, dass die Datenflussführung von den Daten gesteuert wird bzw. von ihnen abhängt. Die Reihenfolge der Ausführung wird vom Fluss der Daten innerhalb der Knoten im Programm bestimmt. Diese Knoten besitzen Eingänge, welche bei Erhalt gültiger Daten die zugehörige Programmlogik ausführen und die entsprechenden Ausgangsdaten erzeugen. Die erzeugten Ausgangsdaten werden dann an den nächsten Knoten in der Verkabelung weiter übertragen und/oder am Frontpanel angezeigt.⁹⁹

⁹⁷ Vgl. www.ni.com (2019b), Online-Quelle [18.10.2019].

⁹⁸ Vgl. www.ni.com (2019c), Online-Quelle [18.10.2019].

⁹⁹ Vgl. www.ni.com (2019c), Online-Quelle [18.10.2019].

Auswahl der Komponenten

Das Frontpanel ist die grafische Benutzeroberfläche, auf dem z. B. Werte eingegeben oder aber auch angezeigt werden können. Mittels der sogenannten Elementpalette können verschiedene Anzeige- und Bedienelemente dem Frontpanel hinzugefügt werden. Vorgefertigte oder selbst erstellte Funktionsblöcke werden in LabVIEW auch VI (virtuelle Instrumente) genannt. Abbildung 34 zeigt beispielhaft das Frontpanel und die Elementpalette rechts daneben.¹⁰⁰

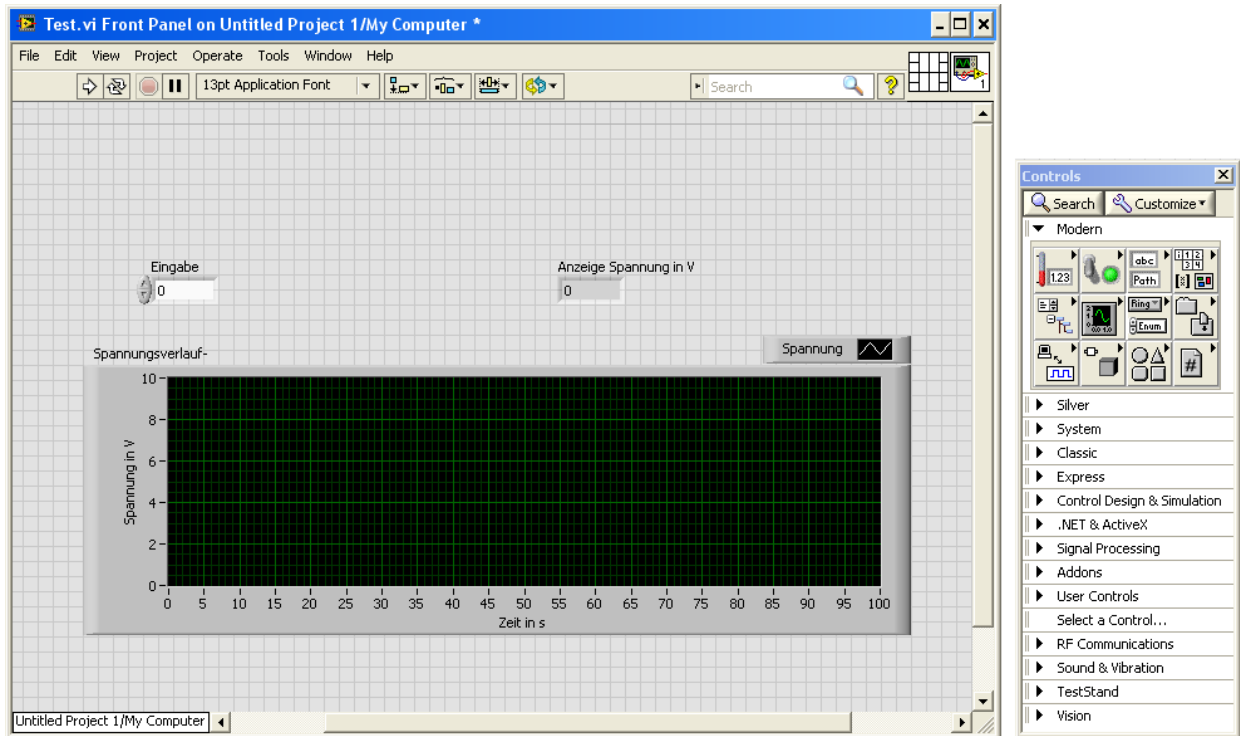


Abbildung 34: Frontpanel und Elementpalette, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 35 stellt ein einfaches Beispiel einer Multiplikation dar. Dabei wird die Zahl 1 mit der Zahl 2 multipliziert und das Ergebnis angezeigt. Links in dieser Abbildung ist die grafische Benutzeroberfläche mit den Werten der Zahl 1 und der Zahl 2 sowie auch dem Ergebnis erkennbar. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das zugehörige Blockdiagramm ersichtlich. Im Blockdiagramm ist die Verkabelung der Multiplikation dargestellt. Die darin gezeigten Werte sind nur Beispielwerte.

¹⁰⁰ Vgl. www.ni.com (2019d), Online-Quelle [18.10.2019].

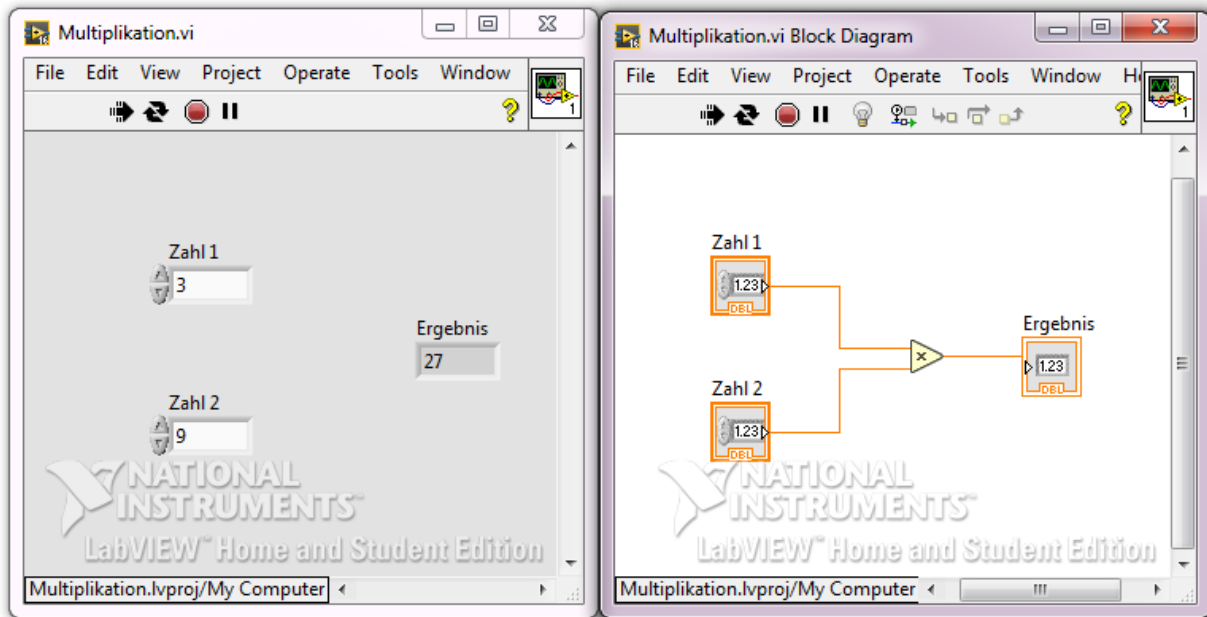


Abbildung 35: Multiplikation in LabVIEW, Quelle: Eigene Darstellung.

Für diese Arbeit wird die Version 2012 von LabVIEW verwendet, da diese im Unternehmen verfügbar ist und eine entsprechende I/O-Schnittstellenhardware für die Ansteuerung vorrätig ist.

6.5.2 Hardware Schnittstelle

National Instruments bietet zu der Software LabVIEW auch entsprechende Hardware für die Datenerfassung zwischen der Außenwelt und dem Computer an. Angebotene Funktionen sind nach www.ni.com u.a. folgende:¹⁰¹

- Analog-I/O
- Digital-I/O
- Counter/Timer
- Multifunktionen – welche eine Kombination der oben erwähnten Funktionen darstellen.

Ein System, welches für die Datenerfassung zuständig ist, wird bei National Instruments als DAQ (Data Acquisition)-System bezeichnet. Dieses DAQ-System enthält Hardware für den Anschluss von Sensoren und Aktoren, Verbindungskabel zu der entsprechenden DAQ-Hardware, die zugehörige Software bzw. Treiber sowie am Ende den Computer zur Verarbeitung. Diese Bestandteile eines DAQ-Systems sind in Abbildung 36 dargestellt.¹⁰²

¹⁰¹ Vgl. www.ni.com (2019e), Online-Quelle [20.10.2019].

¹⁰² Vgl. www.ni.com (2019f), Online-Quelle [20.10.2019].

Diese DAQ-Hardware weist nach Angaben von www.ni.com folgende Eigenschaften auf:¹⁰³

- 16 analoge Eingänge (je 16-Bit),
- 2 analoge Ausgänge, Spannungsbereich ± 10 V
- 8 digitale Ein- bzw. Ausgänge

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der benötigten Ein- und Ausgänge für die DAQ-Hardware entsprechend der eingesetzten Sensoren und Aktoren. Es ist ersichtlich, dass sich die benötigten Funktionen mit der ausgewählten DAQ-Hardware umsetzen lassen.

| Ein-Ausgang | Analog/Digital | Funktion |
|-------------|----------------|--------------------------------|
| Eingang | Analog | Drucksensor einlesen |
| Eingang | Analog | Temperatursensor einlesen |
| Eingang | Counter | Drehzahl einlesen |
| Ausgang | Analog | Vorgabe Sollwert für Drehzahl |
| Ausgang | Digital | Ansteuerung Heizmatte |
| Ausgang | Digital | Ansteuerung Ventil Lufteinlass |
| Ausgang | Digital | Ansteuerung Ventil Luftauslass |

Tabelle 9: Übersicht der benötigten Ein- und Ausgänge, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.3 Berechnung der Auflösung

Für die beiden analogen Eingänge, für den Drucksensor und den Temperatursensor bzw. den dafür verwendeten Messumformer, ergibt sich die Auflösung durch die Verwendung der DAQ-Hardware mit 16-Bit wie folgt:

Allgemein gilt für die Auflösung, bezogen auf die Spannung:

$$\frac{U_{ref}}{2^N} = \text{Auflösung} \quad (6.2)$$

U_{ref}/V Referenzspannung

N Anzahl der Bit

¹⁰³ Vgl. www.ni.com (2019g), Online-Quelle [20.10.2019].

Die 16-Bit der analogen Eingänge entsprechen einem Wert von:

$$16 \text{ Bit} = 2^{16} = 65.536 \quad (6.3)$$

Die Spannungsauflösung des Drucksensors, bezogen auf den analogen Ausgangsspannungsbereich von 0 V bis 10 V, ergibt sich beim Einsetzen in Formel 6.2 zu:

$$\frac{10 \text{ V}}{65.536} = 0,152 \text{ mV} \quad (6.4)$$

Bezogen auf den Druckbereich, ergibt sich, unter Abwandlung auf den Druck der Formel 6.2, eine Druckauflösung von:

$$\frac{10 \text{ bar}}{65.536} = 0,152 \text{ mbar} \quad (6.5)$$

Die Spannungsauflösung des Temperatursensors bzw. des Messumformers, bezogen auf den Ausgangsspannungsbereich von 0 V bis 10 V, ergibt unter Verwendung der Formel 6.2:

$$\frac{10 \text{ V}}{65.536} = 0,152 \text{ mV} \quad (6.6)$$

Für den Temperaturbereich des Messumformers von 0 °C bis 200 °C, ergibt sich, durch Abwandlung auf die Temperatur der Formel 6.2, eine Temperatureauflösung von:

$$\frac{200 \text{ °C}}{65.536} = 0,00305 \text{ °C} \quad (6.7)$$

Aus diesen berechneten Werten ergibt sich, dass die Auflösungen wesentlich genauer sind als die Anforderungen. Hier wäre es theoretisch möglich eine alternative DAQ-Hardware einzusetzen. Jedoch macht dies aus wirtschaftlichen Gründen keinen Sinn, da die eingesetzte DAQ-Hardware im Unternehmen schon vorhanden ist.

6.6 RDK-System

Als zu prüfendes Reifendruckkontrollsystem wurde ein bereits vorhandenes und einsatzfähiges System aus einem aktuell verfügbaren Projekt gewählt. Dieses System ist bereits auf einem Prüfstand aufgebaut und funktionstüchtig integriert.

Durch das bereits funktionstüchtige System ist es nur mehr notwendig die zugehörigen RDK-Sensoren in Bewegung zu versetzen, damit diese die Übertragung der notwendigen Daten an das zentrale RDK-Steuergerät beginnen. Die Übertragung der Informationen passiert auf einer Frequenz von 433 MHz.

Bei diesem System handelt es sich um ein direktes RDK-System, welches den Relativdruck anzeigt.

Die zugehörigen RDK-Sensoren verfügen, wie im Unterkapitel 2.2 erwähnt, über einen integrierten Druck- und Temperatursensor.

7 KONZEPTION DER DRUCKKAMMER

7.1 CAD-Konstruktion

Entsprechend der Vorgaben, dem in Unterkapitel 5.2 vorgestellten und ausgewählten Konzept sowie auch den ausgewählten Komponenten, wird eine erste Darstellung der Druckkammer mittels eines CAD (Computer-Aided Design)-Programmes visualisiert.

Bei dieser Visualisierung wird das Hauptaugenmerk in erster Linie auf die benötigten Abmessungen der Druckkammer gelegt. Ausschlaggebend für die gewählten Abmessungen sind die geometrischen Angaben der Heizmatte sowie auch der Platz im Inneren der Druckkammer, damit der Motor inklusive den RDK-Sensoren rotieren kann.

Abbildung 38 zeigt die Vorderansicht inklusive den Außenabmessungen der Druckkammer.

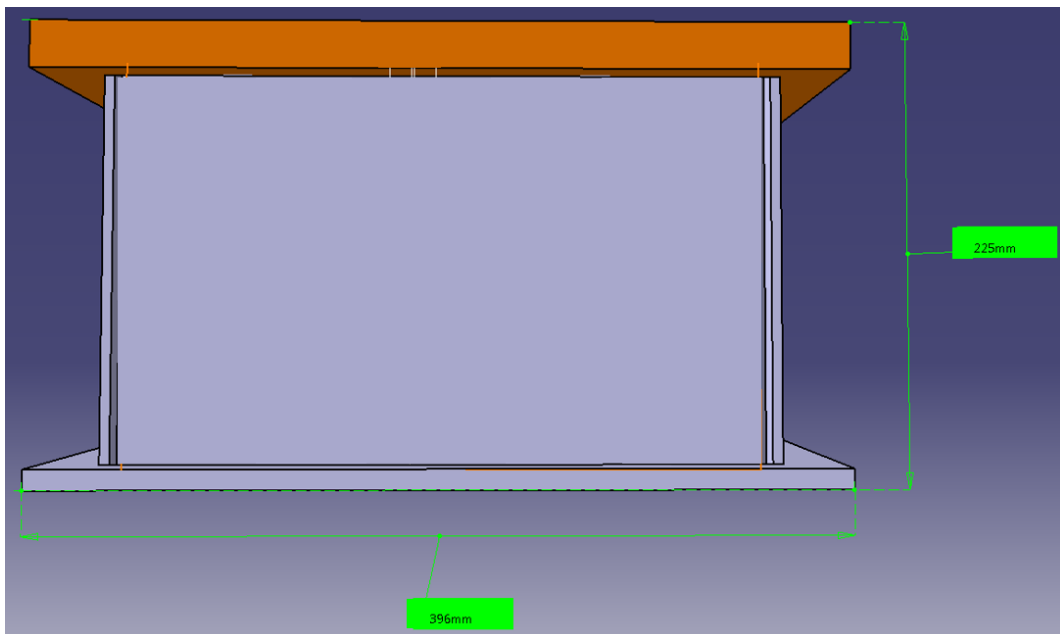


Abbildung 38: Vorderansicht der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 39 ist die Draufsicht der Druckkammer ohne Deckel dargestellt. In dieser Abbildung sind zusätzlich zu den Außenabmessungen noch der eingesetzte Motor, die RDK-Sensoren sowie auch die Heizmatte, in rot dargestellt, ersichtlich. In dieser Ansicht wird auf die Darstellung und Positionierung der anderen Bauteile gezielt verzichtet.

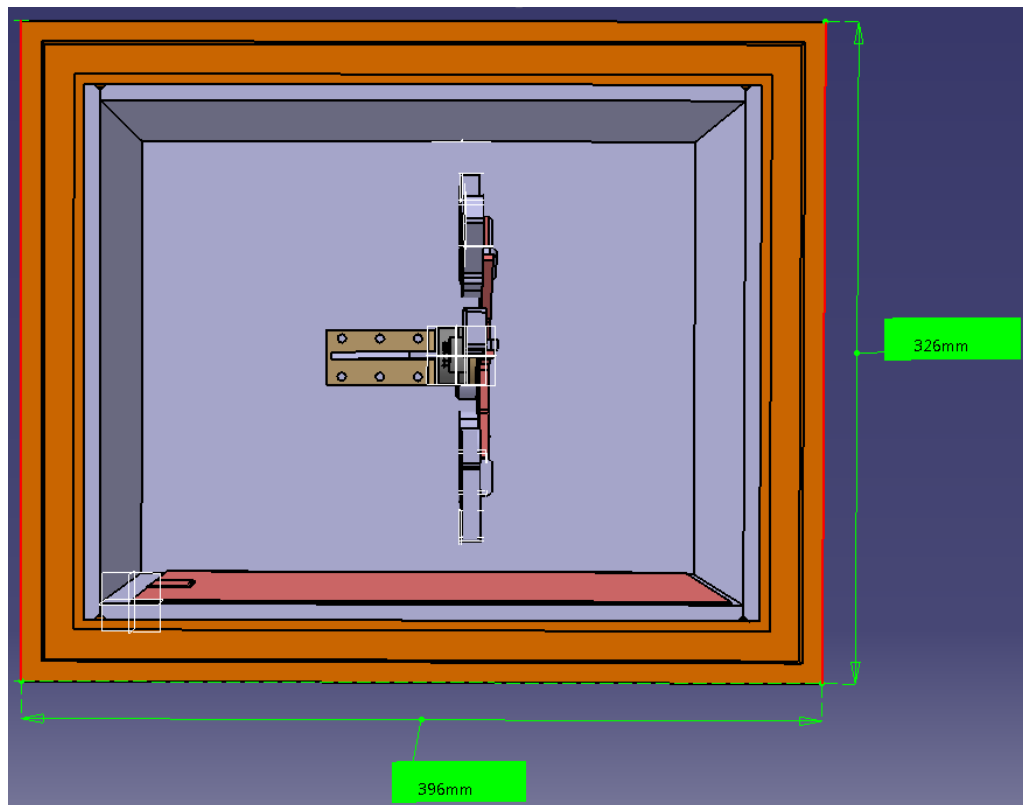


Abbildung 39: Draufsicht der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

7.2 Aufbau

Ursprünglich war geplant die Druckkammer aus Kunststoff zu fertigen. Jedoch verfügt das Unternehmen nicht über das notwendige Know-how für diese Umsetzung. Eine externe Beauftragung für die Fertigung der Druckkammer aus Kunststoff entspricht nicht dem Zeitplan dieser Arbeit.

Entsprechend der CAD-Konstruktion wird von der unternehmensinternen Schlosserei die Druckkammer schlussendlich aus Stahl gefertigt. Hierfür werden 8 mm Stahlplatten mittels MIG (Metall-Inertgas)- und MAG (Metall-Aktivgas)-Schweißverfahren miteinander verbunden.

Anschließend werden die restlichen Auslässe für die im Konzept angegebenen Sensoren und Aktoren hergestellt. Dabei wird u.a. darauf geachtet, dass der Temperatursensor nicht direkt vom Lufteinlassventil mit Luft angeströmt wird.

Um die Druckkammer bestmöglich abzudichten, wird zwischen dem Gehäuse und dem Deckel noch eine Dichtung verbaut.

Abbildung 40 zeigt die Druckkammer im geschlossenen Zustand nach dem Aufbau. Ersichtlich ist auch das zusätzlich angebaute Manometer aus dem Konzept.



Abbildung 40: Geschlossene Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung.

Alle Anschlüsse für die Sensoren wurden mit zu den Sensoren passenden Gewinden ausgeführt, welche einen eventuellen Tausch von Komponenten vereinfachen sollen.

Anschließend werden der Temperatur- und Drucksensor und die beiden Magnetventile an der Druckkammer befestigt sowie der Motor und die Heizmatte im Inneren dieser positioniert.

Die schraubbaren Verbindungen werden mittels eines Dichtungsbandes, auch Teflonband genannt, abgedichtet. Alle notwendigen Kabel werden durch den Kabelauslass nach außen geführt und danach wird dieser mit Hilfe eines Spezialklebers vergossen.

In Abbildung 41 ist die offene Druckkammer ersichtlich. In der Druckkammer ist der montierte Motor inklusive des Rotors dargestellt. Auf diesem Rotor sind, wie schon im Konzept dargestellt, zwei RDK-Sensoren verschraubt.

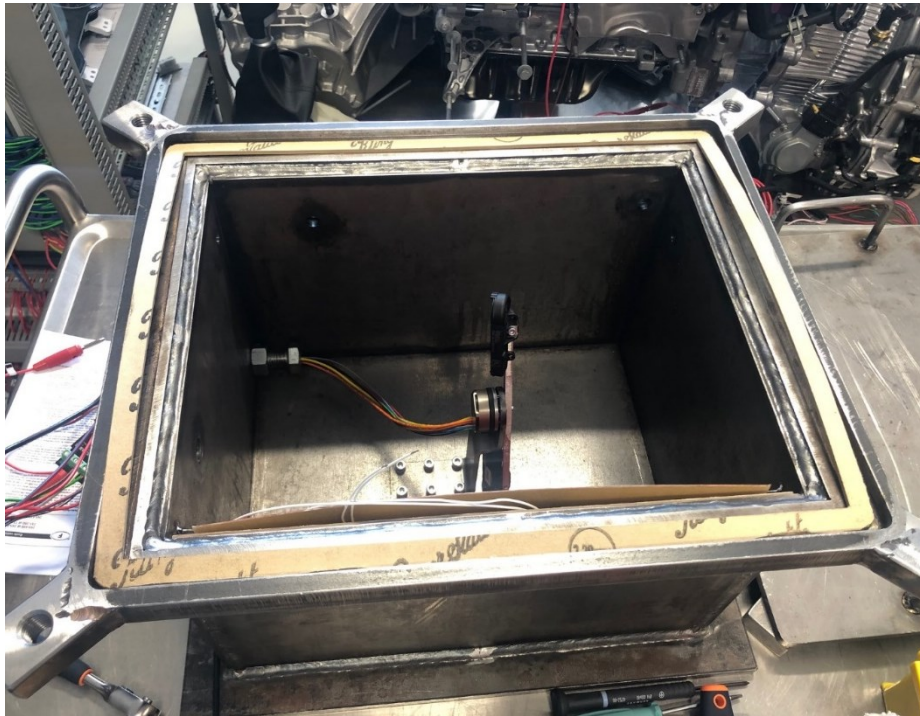


Abbildung 41: Druckkammer ohne Deckel, Quelle: Eigene Darstellung.

Abschließend wird im Inneren der Druckkammer noch eine Wärmeisolierung, für eine bessere Temperaturbeständigkeit, angebracht.

7.3 Konzepterweiterung

Dadurch, dass es sich bei der Druckkammer wegen der Stahlkonstruktion um einen Faraday'schen Käfig handelt, muss das in Unterkapitel 5.2 beschriebene Konzept noch um eine Antenne für die Funkübertragung zwischen den RDK-Sensoren im Inneren der Druckkammer und dem zentralen Steuergerät außerhalb erweitert werden.

Nachfolgend wird auf den Faraday'schen Käfig sowie auf die Antenne eingegangen:

7.3.1 Faraday'scher Käfig

Als Faraday'scher Käfig wird eine geschlossene Hülle aus elektrisch leitendem Material bezeichnet, welche zu allen Seiten geschlossen ist. Dadurch schützt der Käfig vor elektrischen Feldern und auch Blitzen. Wenn auf einen Faraday'schen Käfig ein elektrisches Feld einwirkt, entsteht durch die starken Anziehungskräfte eine Ladungsträgerverschiebung. Durch diesen Effekt wird der Käfig selbst geladen. Jedoch ist die Ladung des Käfigs genau entgegengesetzt der anliegenden Ladung. Dadurch kommt es zur Aufhebung der Feldlinien im Inneren des Käfigs. Es erfolgt somit die gegenseitige Aufhebung der beiden elektrischen Felder. Es folgt, dass der Käfig von jeglichen Ladungseinflüssen abgeschirmt ist. Einsatz findet der Faraday'sche Käfig dort, wo elektrische Felder nicht nach innen eindringen sollten oder aber auch nicht

nach außen austreten sollen. Einsatzbereiche sind etwa Hochspannungsschutzräume aus Drahtgeflecht, EMV-Labore, Abschirmungskäfige bei Hochfrequenzgeräten oder aber auch Flugzeuge und Autos.¹⁰⁴

Abbildung 42 zeigt die Ladungsverschiebung im Faraday'schen Käfig. Rot zeigt dabei die Ladung des Käfigs an. Im Inneren des Käfigs heben sich die beiden elektrischen Felder (rote und schwarze Feldlinien) auf.

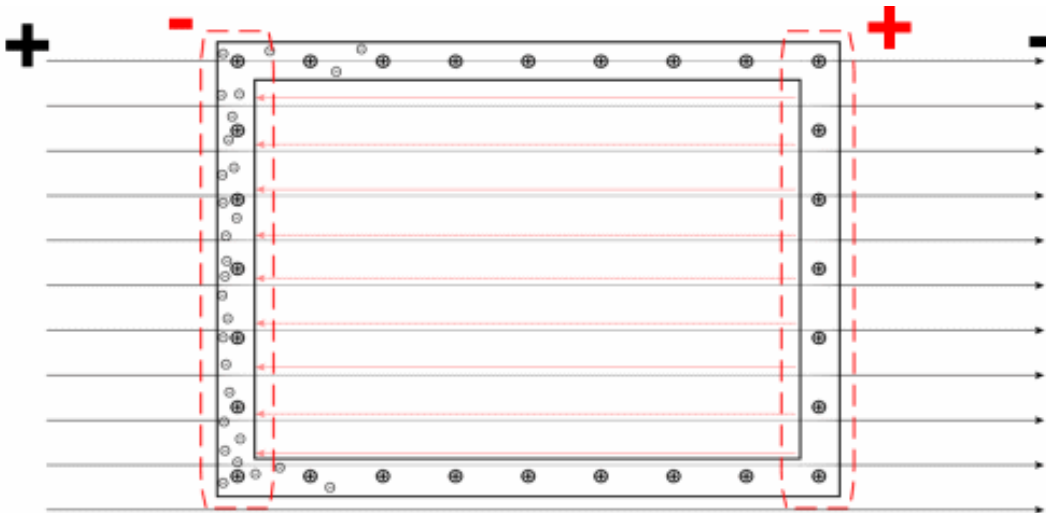


Abbildung 42: Prinzip der Ladungsverschiebung im Faraday'schen Käfig, Quelle: Hüttner (2017), Online-Quelle [22.10.2019].

7.3.2 Antenne

Definiert wird eine Antenne als Einrichtung, welche elektromagnetische Wellen senden und empfangen kann. Dabei agiert sie als metallischer Wandler, um eine elektromagnetische Welle zwischen Leitung und dem freien Raum umzuwandeln. Jeder einfache Draht ist vom Prinzip eine Antenne. Die Antenne stellt zwischen dem Sender oder aber auch dem Empfänger und dem Übertragungsmedium die Schnittstelle dar. Somit übernimmt die Antenne eine sehr wichtige Funktion bei einer Funkverbindung.¹⁰⁵

„Antennen basieren auf dem Resonanzprinzip und werden durch einen offenen Schwingkreis gebildet. Das bedeutet, dass die Antenne an die Empfangsfrequenz angepasst sein muss und die Größe des Resonanzteils daher unmittelbar von der Wellenlänge bzw. einem festen Bruchteil der Wellenlänge (λ) abhängt.“¹⁰⁶

Die optimale Anpassung wird durch die Größe der Antenne erreicht. Um diese optimale Anpassung zu erreichen, wird die Größe der Antenne auf λ , $\lambda/2$, $\lambda/4$ oder auch auf $\lambda/8$ abgestimmt.¹⁰⁷

¹⁰⁴ Vgl. Hüttner (2017), Online-Quelle [22.10.2019].

¹⁰⁵ Vgl. www.elektronik-kompodium.de (2019d), Online-Quelle [23.10.2019].

¹⁰⁶ www.itwissen.info (2019), Online-Quelle [23.10.2019].

¹⁰⁷ Vgl. www.itwissen.info (2019), Online-Quelle [23.10.2019].

7.3.3 Berechnung der Länge der Antenne

Allgemein gilt für die Wellenlänge λ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (7.1)$$

| | |
|-------------|----------------------|
| λ/m | Wellenlänge |
| $c/m/s$ | Lichtgeschwindigkeit |
| f/Hz | Frequenz |

Mit der Funkfrequenz des eingesetzten RDK-Systems ergibt sich die Wellenlänge nach der Formel 7.1 wie folgt:

$$\lambda = \frac{300.000.000 \text{ m/s}}{433.000.000 \text{ Hz}} = 0,6928 \text{ m} \quad (7.2)$$

Für den RDK-Prüfstand wird als Antenne ein einfacher Draht mit der Länge $\lambda/4$ gewählt und in die Druckkammer integriert. Aus Folgendem resultiert die Länge der zu verwendeten $\lambda/4$ -Antenne:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0,6928 \text{ m}}{4} = 0,1732 \text{ m} = 17,32 \text{ cm} \quad (7.3)$$

8 VERSUCHSMESSUNG DER DRUCKKAMMER

Nachdem der Aufbau der Druckkammer abgeschlossen ist, wird diese auf Dichtheit untersucht. In weiterer Folge wird auch geprüft, ob die Funkübertragung von den RDK-Sensoren im Inneren der Druckkammer zum außenliegenden, zentralen RDK-Steuergerät gegeben ist.

8.1 Prüfen der Dichtheit

Für das Prüfen der Dichtheit der Druckkammer wird über den Kugelhahn Luft in das Gehäuse eingelassen. Dies passiert mit dem im Unternehmen bereits vorhandenen Druckluftanschluss.

Aus Sicherheitsgründen wird dabei ein Druck von max. 2 bar in der Druckkammer aufgebaut. Es wurde beschlossen, den Druck nicht über 2 bar ansteigen zu lassen, bevor eine abgesicherte Druckprüfung des Gehäuses bzw. der Druckkammer durchgeführt wurde.

Abbildung 43 zeigt den abgesperrten Kugelhahn inklusive des Anschlusses an das zentrale Druckluftsystem. In dieser Abbildung ist durch das gezeigte Manometer erkennbar, dass ein Druck von ca. 1,5 bar im Druckgehäuse vorherrscht.



Abbildung 43: Manometer und Kugelhahn, Quelle: Eigene Darstellung.

Dieser Test hat gezeigt, dass bis 2 bar nicht alle Schweißverbindungen luftdicht sind und Luft entweichen kann. Nach entsprechender Nacharbeit des Gehäuses wurde dieser Test allerdings erfolgreich bestanden.

8.2 Prüfen der Funkübertragung

Um die Funktion der RDK-Sensoren und die Funkübertragung zum zentralen Steuergerät prüfen zu können, ist es notwendig den Motor mittels einer fixen Drehzahl anzusteuern.

Die Drehzahl des Motors wurde mittels der Software Motion Manager auf eine fixe Drehzahl für diesen Test eingestellt. Siehe dazu auch das Unterkapitel 9.2 bezüglich der Antriebskonfigurationen des Motors.

Wie im Unterkapitel 6.6 erwähnt, ist das zentrale RDK-Steuergerät bereits auf einem anderen Prüfstand im Unternehmen im Einsatz. Dadurch, dass dieses Steuergerät eine CAN-Bus Anbindung besitzt, können alle notwendigen Daten des RDK-Systems, wie der Reifendruck und die Temperatur, auf einem separaten Messrechner dargestellt werden. Somit kann geprüft werden, ob ein RDK-Sensor aktiv sendet oder nicht. Zusätzlich werden auch die gesendeten Daten angezeigt.

Als Erstes wird ein Test ohne den Deckel der Druckkammer durchgeführt. Dadurch kann die grundlegende Funktionalität des Motors und der RDK-Sensoren geprüft werden.

Dieser Test zeigt ein zu erwartendes, positives Ergebnis. Als Druck werden dabei 0 bar und eine Temperatur von 25 °C angezeigt. Dadurch, dass es sich bei den eingesetzten RDK-Sensoren um eine Relativdruckmessung handelt, ist der angezeigte Druck von 0 bar richtig.

Daraufhin wird der Deckel der Druckkammer geschlossen und diese unter Druck gesetzt, wobei wieder das festgelegte Maximum von 2 bar eingehalten wird.

Das Ergebnis dieser Messung fällt ebenso positiv aus. Es werden sowohl Druck als auch Temperatur der beiden RDK-Sensoren vom zentralen RDK-Steuergerät empfangen.

In Abbildung 44 sind die empfangenen Daten der beiden verbauten RDK-Sensoren dargestellt. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass der RDK-Sensor links vorne sowie auch rechts hinten in der Druckkammer verbaut ist. Von diesen beiden RDK-Sensoren werden jeweils der Druck in kPa und die Temperatur in °C angezeigt. Bei einer längeren Messung hat sich gezeigt, dass sich diese beiden Druckwerte auf denselben Wert angleichen.

Die beiden RDK-Sensoren vorne rechts und hinten links zeigen beim Druck den Wert 714 und eine Temperatur von 15 °C an. Die Kombination dieser Werte bedeutet, dass kein Signal dieser Sensoren empfangen wird. Zusätzlich wird in dieser Abbildung, jeweils unter der gemessenen Temperatur, angezeigt, ob eine Warnmeldung für die Temperatur und/oder für den Druck aktiv ist. Es ist ersichtlich, dass für links vorne und rechts hinten eine Warnung für einen zu niedrigen Luftdruck aktiv ist. Diese Warnung bezieht sich auf das jeweilige Projekt und ist herstellerabhängig.



Abbildung 44: Anzeige erste Versuchsmessung, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Versuchsmessungen haben gezeigt, dass die Funkübertragung von den RDK-Sensoren im Inneren der Druckkammer zum außenliegenden, zentralen RDK-Steuergerät gegeben ist.

9 AUFBAU DES PRÜFSTANDES

Nachdem die Dichtheit der Druckkammer und auch die Funkübertragung der RDK-Sensoren positiv getestet wurden, wird der Prototyp des RDK-Prüfstandes weiter aufgebaut. Hierfür werden die ausgewählten Komponenten verkabelt, die Einstellungen des Motors durchgeführt und die Ein- sowie auch Ausgänge der LabVIEW Hardware auf deren Funktionstüchtigkeit bzw. die richtigen Einstellungen geprüft.

9.1 Verkabelung

Für die Verkabelung des RDK-Prüfstandes wird eine Anschlussbelegung erstellt. Diese Anschlussbelegung ist aus Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 dem Anhang 1 zu entnehmen.

Aus diesen Tabellen ist ersichtlich, dass für die beiden Magnetventile und auch für die Heizung Relais eingesetzt werden. Grund dafür ist, dass die verwendete DAQ-Hardware keinen Leistungsausgang besitzt und diese Komponenten nicht direkt ansteuern kann.

Als Spannungsversorgung wird ein vorhandenes 12 V Netzteil eingesetzt.

9.2 Einstellungen des Motors

Für diese Arbeit ist es erforderlich die Drehzahl des Motors mittels analoger Sollwertvorgabe einzustellen und die tatsächliche Drehzahl des Motors wieder einzulesen bzw. auf der grafischen Oberfläche anzuzeigen. Der Zusammenhang der analogen Sollwertvorgabe und der Drehzahl ist aus der Kennlinie in Abbildung 29 zu entnehmen.

Wie im Abschnitt 6.2.2 angegeben, können Einstellungen des eingesetzten Motors mittels der vom Hersteller bereitgestellten Software Motion Manager konfiguriert werden. Hierfür ist es notwendig, den Motor mit dem Speed Controller und diesen mit dem Programmieradapter zu verbinden und an eine 12 V Spannungsversorgung anzuschließen. Mittels eines USB-Kabels wird der Programmieradapter an den Computer angeschlossen und mit Hilfe des Motion Managers eine Verbindung zum Speed Controller hergestellt. Im Programm werden unter den Antriebskonfigurationen für die Funktion Eingang U_{nsoll} , die analoge Sollwertvorgabe für die Drehzahl, und für die Funktion Ausgang FG der Frequenzausgang für die Ausgabe der Drehzahl eingestellt. Die Ermittlung der Drehzahl passiert dabei durch eine Frequenzmessung.

In Abbildung 45 sind die erwähnten Antriebskonfigurationen des Motors inklusive weiterer Einstellmöglichkeiten, welche aufgrund der korrekten Eingabe der Motorbezeichnung nicht mehr genutzt werden, dargestellt.

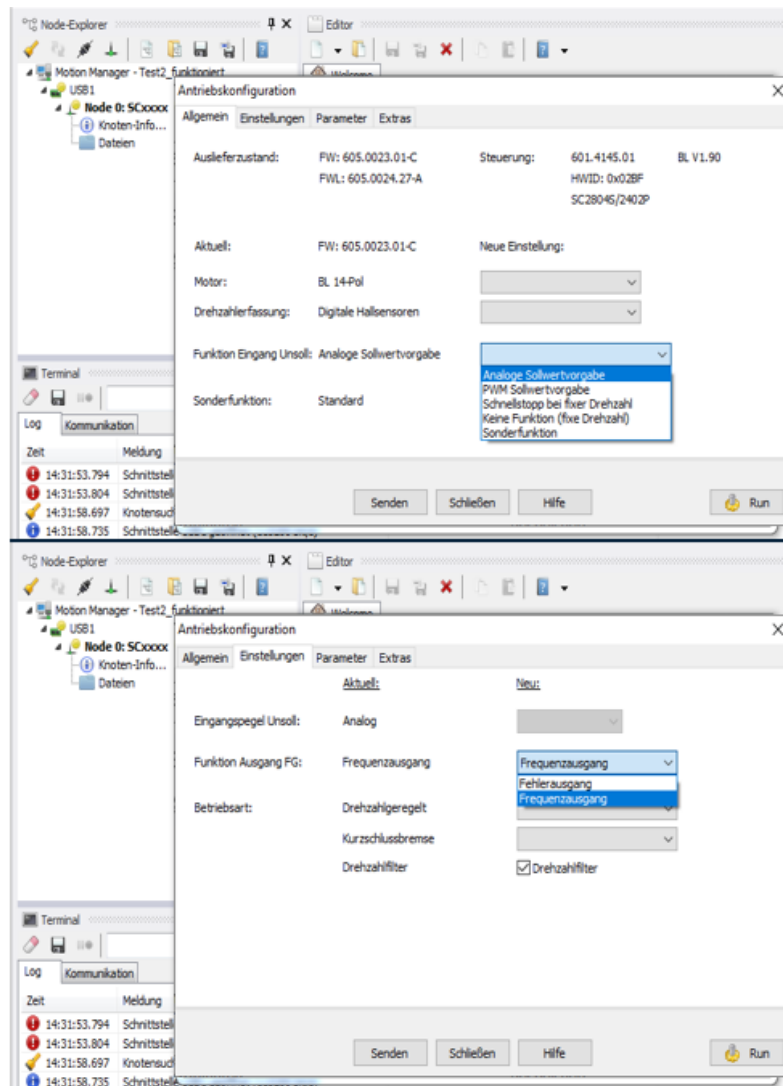


Abbildung 45: Antriebskonfigurationen im Motion Manager, Quelle: Eigene Darstellung.

9.3 Prüfen und Einstellen der I/O-Anschlüsse für LabVIEW

LabVIEW erlaubt es, dass die benötigten Ein- und Ausgänge vorab getestet und eingestellt werden können, ohne dafür ein Projekt bzw. ein Programm zu entwickeln. Dies passiert mit der von National Instruments mitgelieferten Software Measurement & Automation Explorer. Hierfür muss für den entsprechenden I/O-Anschluss ausgewählt werden, welche Signale erzeugt bzw. auch erfasst werden sollen. Das bedeutet, dass angegeben werden muss, ob z. B. eine Spannung erzeugt oder gemessen werden soll.

Tabelle 10 zeigt die Anschlussbelegung der National Instruments Hardware SCB-68, welche für diese Arbeit ausgewählt wurde. In dieser Tabelle sind auch die Erklärung der Funktion sowie der Anschluss an die entsprechende Komponente, wie etwa an den Messumformer oder an den Drucksensor, ersichtlich. Für diese Ein- und Ausgänge werden vorab die notwendigen Einstellungen vorgenommen und die Funktionen getestet.

| Komponente | Pin | Bezeichnung | Erklärung | Anschluss an |
|------------|-----|-------------|--|------------------------------|
| SCB-68 | 21 | AO1 | Steuerspannung für Solldrehzahl | Pin 4, Speed Controller |
| | 68 | AI0 | Analog-Ausgang des Messumformers | Pin 4, Messumformer |
| | 31 | AI10 | Druckausgang 0-10V | Pin 3, Drucksensor |
| | 52 | P0.0 | Ansteuerung Spule, Relais Heizmatte 5 V | Pin A1, Relais Heizmatte 5 V |
| | 17 | P0.1 | Ansteuerung Spule, Relais Einlassventil | Pin A1, Relais Einlassventil |
| | 49 | P0.2 | Ansteuerung Spule, Relais Auslassventil | Pin A1, Relais Auslassventil |
| | 47 | CTR 0 | Frequenz Ausgang für die Ermittlung der IST-Drehzahl | Pin 6, Speed Controller |

Tabelle 10: Anschlussbelegung SCB-68, Quelle: Eigene Darstellung.

Stellvertretend wird das Einstellen und Prüfen des analogen Eingangs AI0 zum Einlesen des analogen Ausgangs des Messumformers für die Temperaturermittlung gezeigt:

Nachdem im Measurement & Automation Explorer die analoge Erfassung der Spannung sowie der Eingangskanal AI0 ausgewählt wurden, wird der zu erwartende Spannungsbereich – dieser liegt hier zwischen 0 V und 10 V – eingegeben. Danach kann das Einlesen des analogen Messwertes gestartet werden.

Abbildung 46 zeigt den durch die Software gemessenen Spannungswert des Messumformers in Volt.

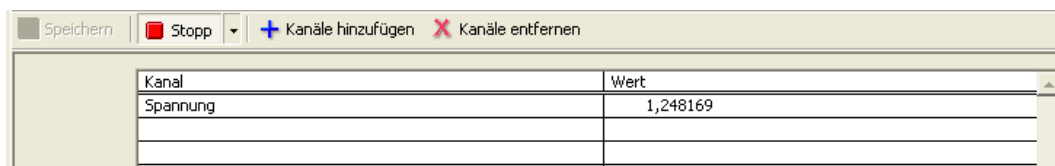


Abbildung 46: Messwert des AI0s, Quelle: Eigene Darstellung.

Entsprechend den Daten des Messumformers, welche in Tabelle 4 ersichtlich sind, ergibt sich bei einem Spannungsbereich von bis zu 10 V und einem Temperaturbereich von bis zu 200 °C ein Umrechnungsfaktor von:

$$\frac{200 \text{ °C}}{10 \text{ V}} = 20 \frac{\text{°C}}{\text{V}} \tag{9.1}$$

Multipliziert man den in Abbildung 46 gemessenen Wert mit dem Umrechnungsfaktor aus Formel 9.1 erhält man die Temperatur T , welche auch der im Raum gemessenen Temperatur entspricht:

$$T = 24,96 \text{ °C} \tag{9.1}$$

9.4 Prototyp des RDK-Prüfstandes

In Abbildung 47 ist der aufgebaute Prototyp des RDK-Prüfstandes dargestellt. Diese Abbildung zeigt die Druckkammer, die Verkabelung inklusive der Relais und die Luftschläuche von der Druckkammer zu den Magnetventilen. Im Hintergrund sind u.a noch die SCB-68 Hardware für LabVIEW sowie der Speed Controller inklusive Programmieradapter und das 12 V Netzteil ersichtlich.

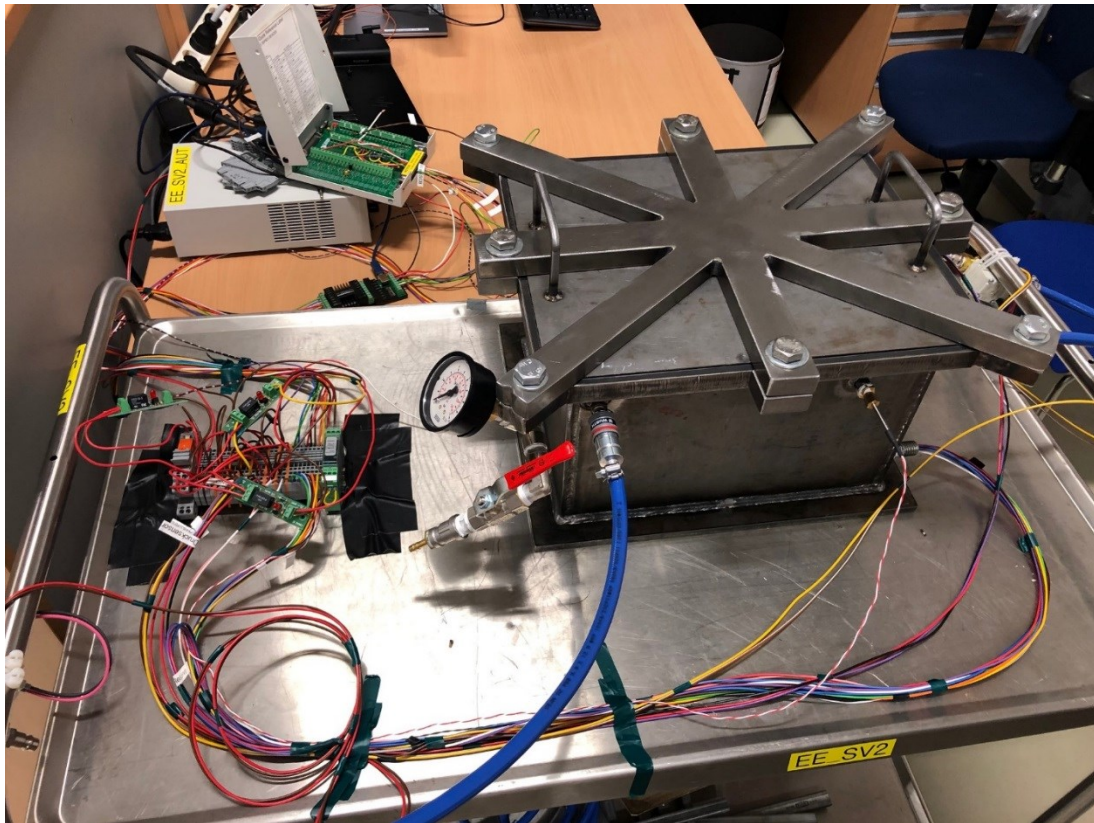


Abbildung 47: Prototyp des RDK-Prüfstandes, Quelle: Eigene Darstellung.

10 UMSETZUNG DER ANSTEUERUNG

Die Umsetzung der Ansteuerung des Prüfstandes mittels LabVIEW findet in zwei Schritten statt: Zuerst erfolgt die Ansteuerung der notwendigen Aktoren, wie Magnetventile und Heizung, sowie das Einlesen des Druck- und Temperatursensors. In weiterer Folge erfolgt die Erstellung einer Regelung für den Prüfstand.

Für die Ansteuerung des Einlass- und Auslassventils, der Heizung sowie zum Einlesen der Druck- und Temperaturmesswerte und zur Vorgabe der Drehzahl, wird eine grafische Oberfläche in LabVIEW entwickelt. Diese Oberfläche wird jeweils um die notwendigen Elemente für die Temperatur- und Druckregelung erweitert.

Für die Temperaturregelung wird die grafische Oberfläche um den Parameterblock mit der Bezeichnung „Stellgrößen für Temperatur“, die Vorgabe des gewünschten Temperaturwertes, die Statusinformation des Temperaturreglers und um eine Trendkurve für die Temperaturregelung ergänzt.

Bei der Realisierung der Druckregelung wird die grafische Oberfläche nochmals um die Vorgabe des Druckes in Bar, die Stellgrößen für die Druckregelung sowie um die Statusinformation des Druckreglers und die entsprechende Trendkurve erweitert.

Abbildung 48 zeigt die grafische Oberfläche für den RDK-Prüfstand inklusive der oben genannten Elemente, welche auch über einen Stopp-Button verfügt, damit das Programm beendet werden kann. Erkennbar ist in dieser Abbildung auch der Schalter mit der Bezeichnung „Kühlen“. Dadurch werden sowohl Einlass- und auch Auslassventil geöffnet und kalte Luft in die Druckkammer eingelassen. Jedoch ist es bei dieser Funktion nicht möglich den Druck konstant zu halten.

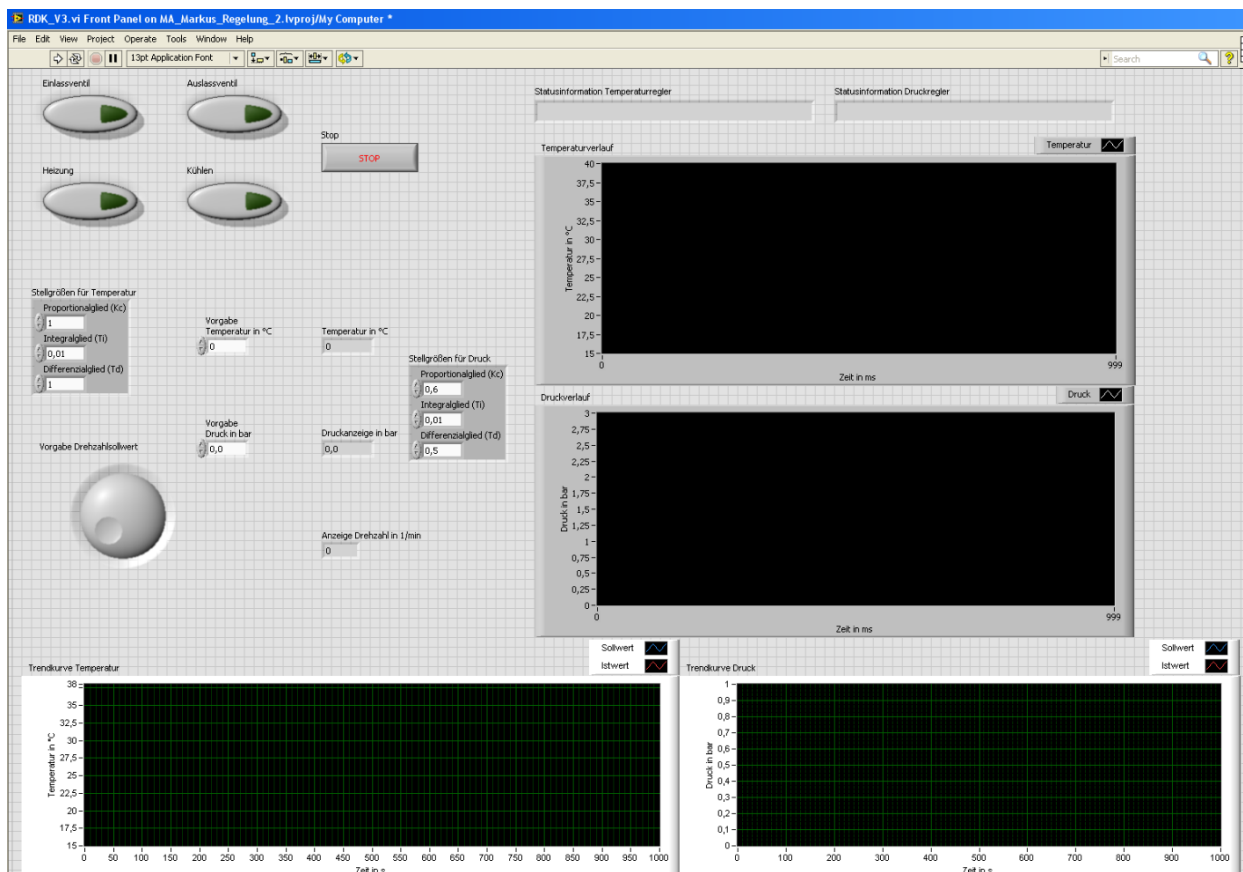


Abbildung 48: Grafische Oberfläche für den RDK-Prüfstand, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Einstellung der Stellgrößen für Temperatur und Druck bzw. die Reglerparameter für die PID-Regler der Druck- und Temperaturregelung sind nicht Teil dieser Arbeit. Deshalb werden hier keine optimalen Werte gezeigt, sondern jene, welche von LabVIEW als Standardparameter gesetzt werden.

Nachfolgend sind die Ansteuerung und die Regelungen mittels LabVIEW erläutert:

10.1 Ansteuerung des Prüfstandes

Mittels Schalter, zu sehen in Abbildung 48, werden je das Einlass- und Auslassventil und die Heizung angesteuert. Zusätzlich sind Anzeigeelemente für die Druck- und Temperaturanzeige in der grafischen Oberfläche untergebracht. Um den Druck- und Temperaturverlauf verfolgen zu können, sind zudem grafische Anzeigen platziert. Für die Einstellung der Drehzahl wird ein Drehregler vorbereitet sowie auch eine Anzeige, um die aktuelle Drehzahl zu visualisieren.

Um die Ansteuerung des Prüfstandes umzusetzen, müssen die dafür notwendigen, in der grafischen Oberfläche unterbrachten Elemente, im Blockdiagramm entsprechend ihrer Funktion programmiert bzw. verkabelt werden.

Die Funktion des Einlesens der Druck- und Temperaturmesswerte sowie die Anzeige dieser Werte sind in Abbildung 49 dargestellt. In dieser Abbildung ist auf der rechten Seite eine While-Schleife zu sehen. Diese dient dazu, dass der Inhalt solange ausgeführt wird, bis der Stopp-Button gedrückt wird. Links außerhalb dieser While-Schleife sind die notwendigen Hardwarekanäle für die DAQ-Hardware definiert, um die Druck- und Temperaturmesswerte, mit der entsprechenden Konfiguration der Abtastung, einzulesen. Diese Messwerte werden in der While-Schleife einem Array (dargestellt als gelbes Rechteck) zugeführt und danach für die Anzeige des Druckes und der Temperatur aufgeteilt, wobei diese jeweils als Wert und als Kennlinie dargestellt sind. Der eingelesene Spannungswert entspricht, nach Abschnitt 6.1.2, direkt dem Druck in Bar, wodurch es keiner zusätzlichen Umrechnung für den Druck bedarf. Für die Anzeige der richtigen Temperatur in °C muss der dafür gemessene Spannungswert noch mit dem Faktor aus der Formel 9.1 multipliziert werden, wie auch in Unterkapitel 9.3 erwähnt. Das Element rechts von der While-Schleife dient dazu, um beim Beenden des Programmes die I/O-Anschlüsse in LabVIEW zu schließen.

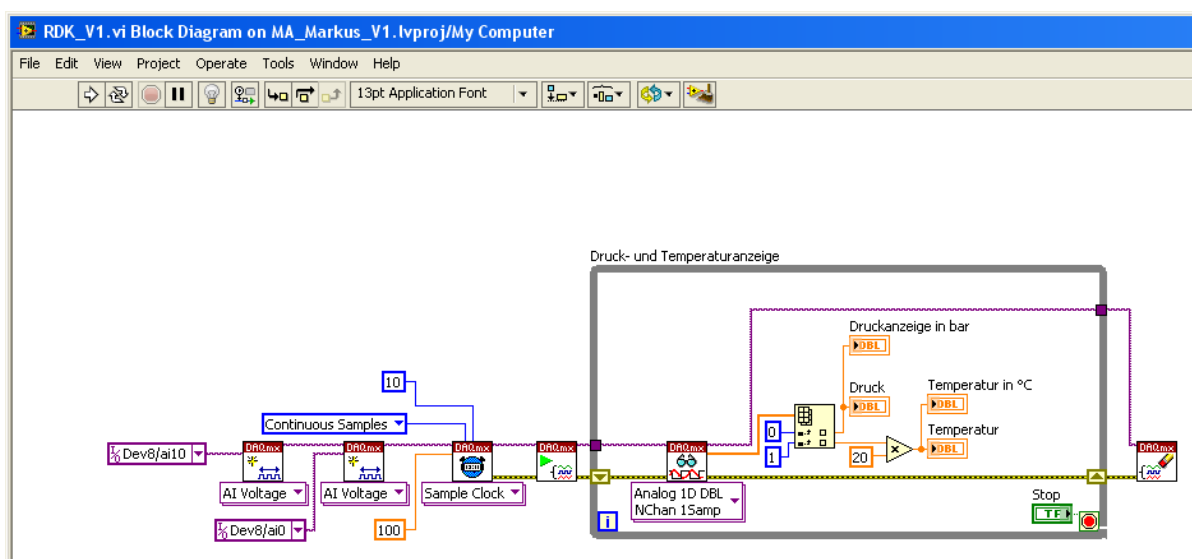


Abbildung 49: Einlesen der Druck- und Temperaturmesswerte, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 50 zeigt das Blockdiagramm für die Ansteuerung des Einlass- und Auslassventils sowie der Heizung. Hierfür wird in der jeweiligen While-Schleife der entsprechende Schalter abgefragt und bei Betätigung der zugehörige Ausgang für die Ansteuerung geschaltet. Ähnlich wie schon für Abbildung 49 erläutert, werden links außerhalb der Schleifen diese Ausgänge entsprechend des Anschlusses an der DAQ-Hardware definiert.

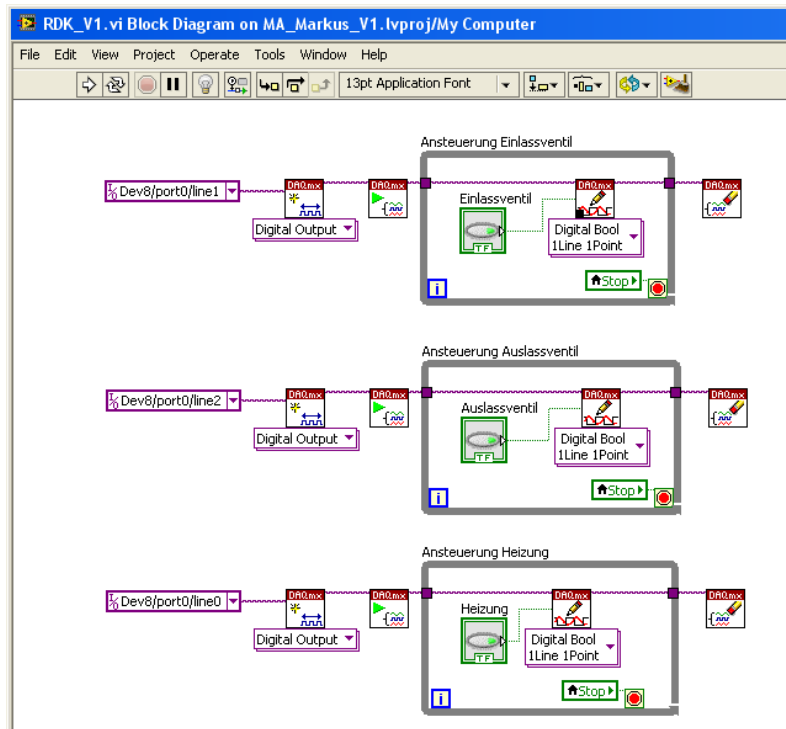


Abbildung 50: Ansteuerung der Magnetventile und der Heizung, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Vorgabe des Drehzahlollwertes wird der am Drehregler eingestellte Wert als Spannung auf den dafür vorgesehenen Ausgang durchgeschaltet. Um eine feinere Einstellung der Drehzahl zu ermöglichen wird der eingestellte Wert durch 1000 dividiert. Die vorherrschende Drehzahl wird mittels Counters erfasst und von LabVIEW als Frequenz f in 1/s wiedergegeben. Dementsprechend wird die so gemessene Frequenz von 1/s in 1/min umgerechnet und mittels Division durch die Anzahl der Impulse pro Umdrehung des Motors auf die Drehzahl n mit der Einheit 1/min umgewandelt.

Das Blockschaltbild für die Vorgabe und das Einlesen der Drehzahl ist in Abbildung 51 dargestellt.

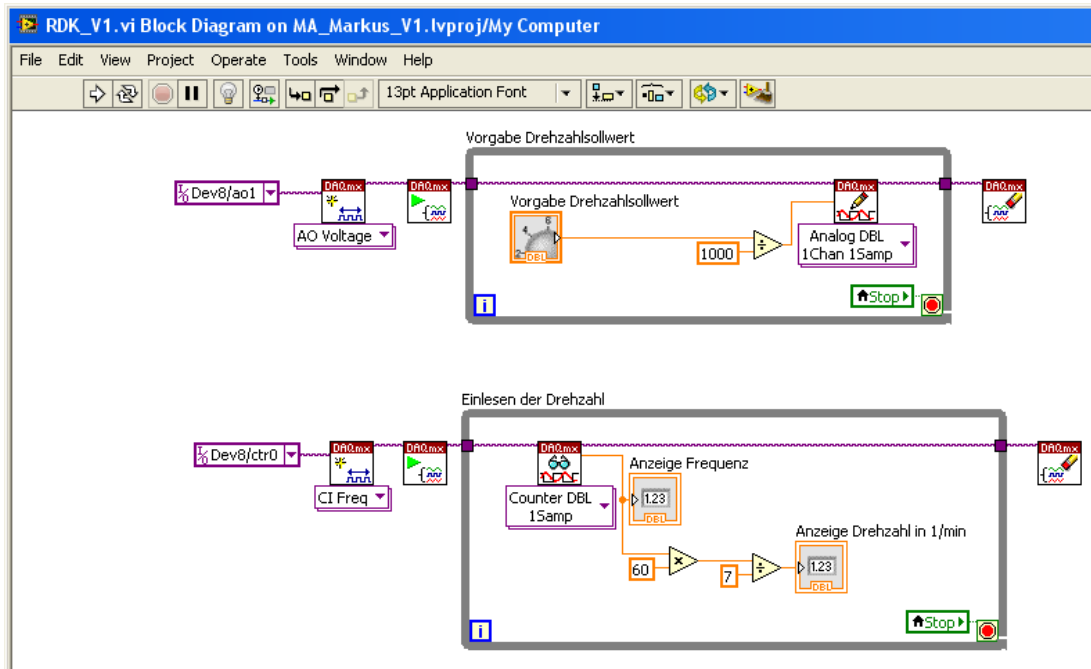


Abbildung 51: Vorgabe und Anzeige der Drehzahl, Quelle: Eigene Darstellung.

10.2 Regelung des Prüfstandes

Für die Regelung des Prüfstandes werden die für die entsprechende Regelung notwendigen Elemente im Blockdiagramm verkabelt bzw. programmiert. Dabei wird die Ansteuerung um die Temperaturregelung und diese nochmals um die Druckregelung ergänzt.

Nachfolgend sind die Temperatur- und Druckregelungen erläutert.

10.2.1 Temperaturregelung

Im Parameterblock, „Stellgrößen für Temperatur“, in Abbildung 48, werden die Werte des PID-Reglers für das Proportionalglied, das Integralglied und das Differentialglied definiert. Bei der Vorgabe der Temperatur wird die gewünschte Temperatur in °C für die Druckkammer eingestellt. Über die Anzeige „Statusinformation Temperaturregler“ wird die Abweichung zwischen dem eingestellten Soll- und Istwert angezeigt. Mit Hilfe der „Trendkurve Temperatur“ kann der Verlauf des Soll- und des Istwertes der Temperatur verfolgt werden, wobei bei einer Messung der Sollwert in blau und der Istwert in rot dargestellt wird.

Dadurch, dass es sich bei dem Ausgang für die Ansteuerung der Heizung um einen digitalen Ausgang handelt, wird dieser bei der Regelung mittels Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert. Das bedeutet, dass bei der Ansteuerung die Zeitdauer des Impulses und der Pause variiert wird.

Dies passiert mittels eines vorgefertigten virtuellen Instruments in LabVIEW. Hierfür werden diesem VI der aktuelle Istwert der Temperatur sowie notwendige Zeitparameter und Grenzwerte zugeführt. Als Ergebnis liefert LabVIEW die entsprechende PWM zum Istwert, um die Heizung anzusteuern. Dies ist im oberen Teil der Abbildung 52 dargestellt.

Im unteren Teil der Abbildung 52 ist die Regelung mittels PID-Regler und die Generierung der Trendkurve dargestellt. Als PID-Regler wird der von LabVIEW zur Verfügung gestellte PID-Regler verwendet. Diesem werden die Stellgrößen aus der grafischen Benutzeroberfläche sowie Sollwerte, Istwerte, Grenzwerte und Zeitwerte bereitgestellt. Die Trendkurve wird mittels eines Arrays erstellt, damit auch vergangene Werte angezeigt werden.

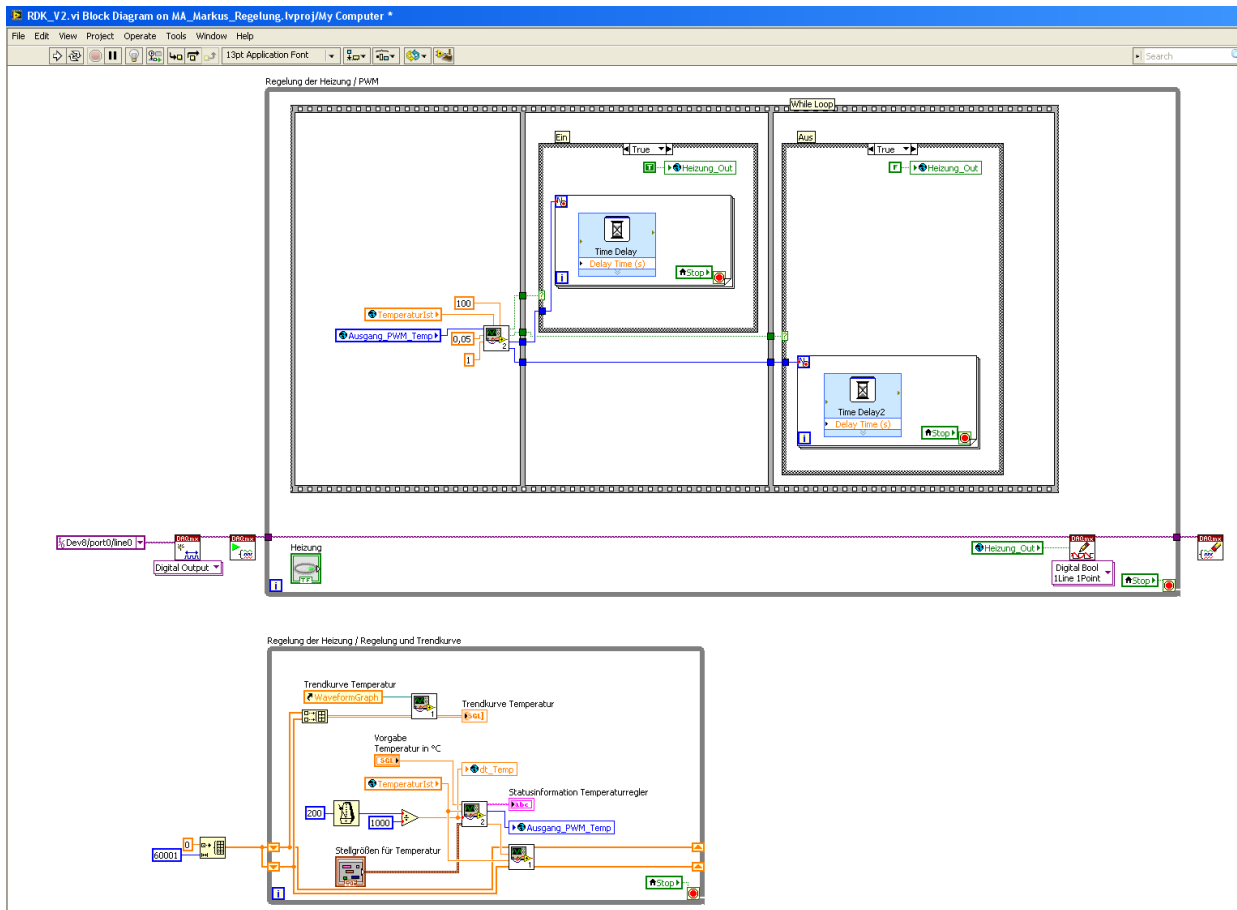


Abbildung 52: Regelung der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung.

Das restliche Blockdiagramm wird bei der Regelung der Temperatur von der Ansteuerung des Prüfstandes aus dem Unterkapitel 10.1 übernommen.

10.2.2 Druckregelung

Für die Druckregelung wird das Blockdiagramm der Temperaturregelung aus dem Abschnitt 10.2.1 entsprechend erweitert.

Das Blockdiagramm für die Druckregelung funktioniert äquivalent der Temperaturregelung, wie im Abschnitt 10.2.1 beschrieben ist. Jedoch mit dem Unterschied, dass bei der Druckregelung zusätzlich eine Auswahl implementiert ist, bei der der Ist- und Sollwert des Druckes miteinander verglichen werden. Ist der Istwert kleiner als der Sollwert, wird das Einlassventil angesteuert, wohingegen im umgekehrten Fall das Auslassventil angesteuert wird. Dieses erweiterte Blockschaltbild inklusive der Auswahl der Ventile ist in Abbildung 53 ersichtlich.

Umsetzung der Ansteuerung

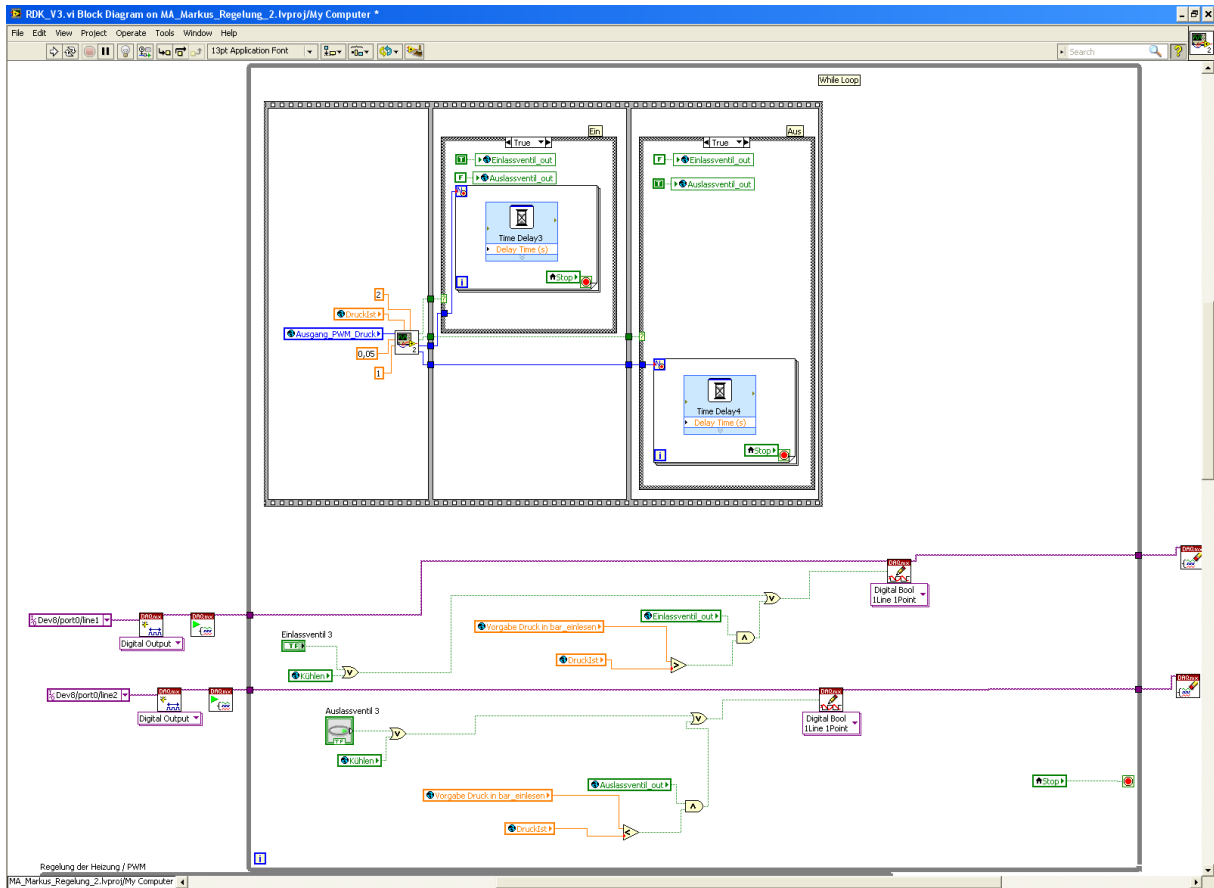


Abbildung 53: Regelung des Druckes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Regelung und die Erstellung der Trendkurve für den Druck funktioniert äquivalent, wie schon für den Temperaturregler beschrieben, und ist in Abbildung 54 dargestellt.

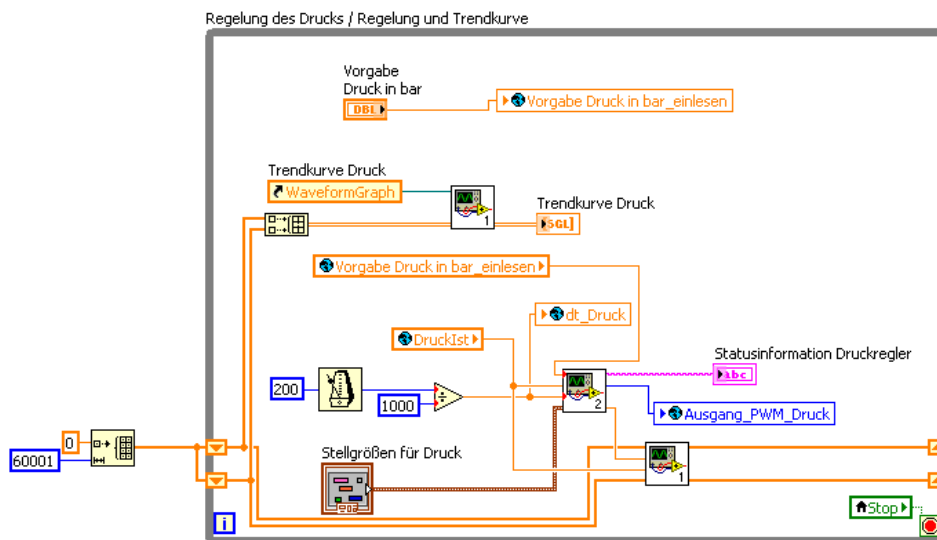


Abbildung 54: Regelung und Trendkurve für den Druck, Quelle: Eigene Darstellung.

11 TEST DES PRÜFSTANDES

In Kapitel 8 konnte bereits die Dichtheit der Druckkammer sowie die funktionierende Funkübertragung der RDK-Sensoren nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die Ansteuerung des Einlass- und Auslassventils sowie die beiden Regelungen getestet. Die gezeigten Abbildungen zeigen die grafische Oberfläche zum entsprechenden Fortschritt. Erst bei der Regelung des Druckes wird die finale grafische Oberfläche abgebildet.

11.1 Einstellen des Druckes

Für die erste Überprüfung des RDK-Prüfstandes wird mittels des Drehreglers eine gewisse Drehzahl für den Motor vorgegeben. Zusätzlich wird das Einlassventil geöffnet, um Druck in der Druckkammer zu erzeugen. Bei den gezeigten Abbildungen sind die Elemente für die Druckregelung noch nicht auf der grafischen Oberfläche integriert.

Abbildung 55 zeigt, dass das Einlassventil geöffnet ist und somit Druck aufgebaut wird. Sehr gut ist der Druckaufbau auch im Graphen für den Druckverlauf erkennbar. Beim Temperaturverlauf ist ersichtlich, dass durch den Lufteinlass über das Einlassventil kalte Luft zugeführt wird und die Temperatur im Inneren der Druckkammer dadurch deutlich absinkt. Zusätzlich können die vorliegenden Werte für den Druck und die Temperatur aus der Mitte der Abbildung entnommen werden.

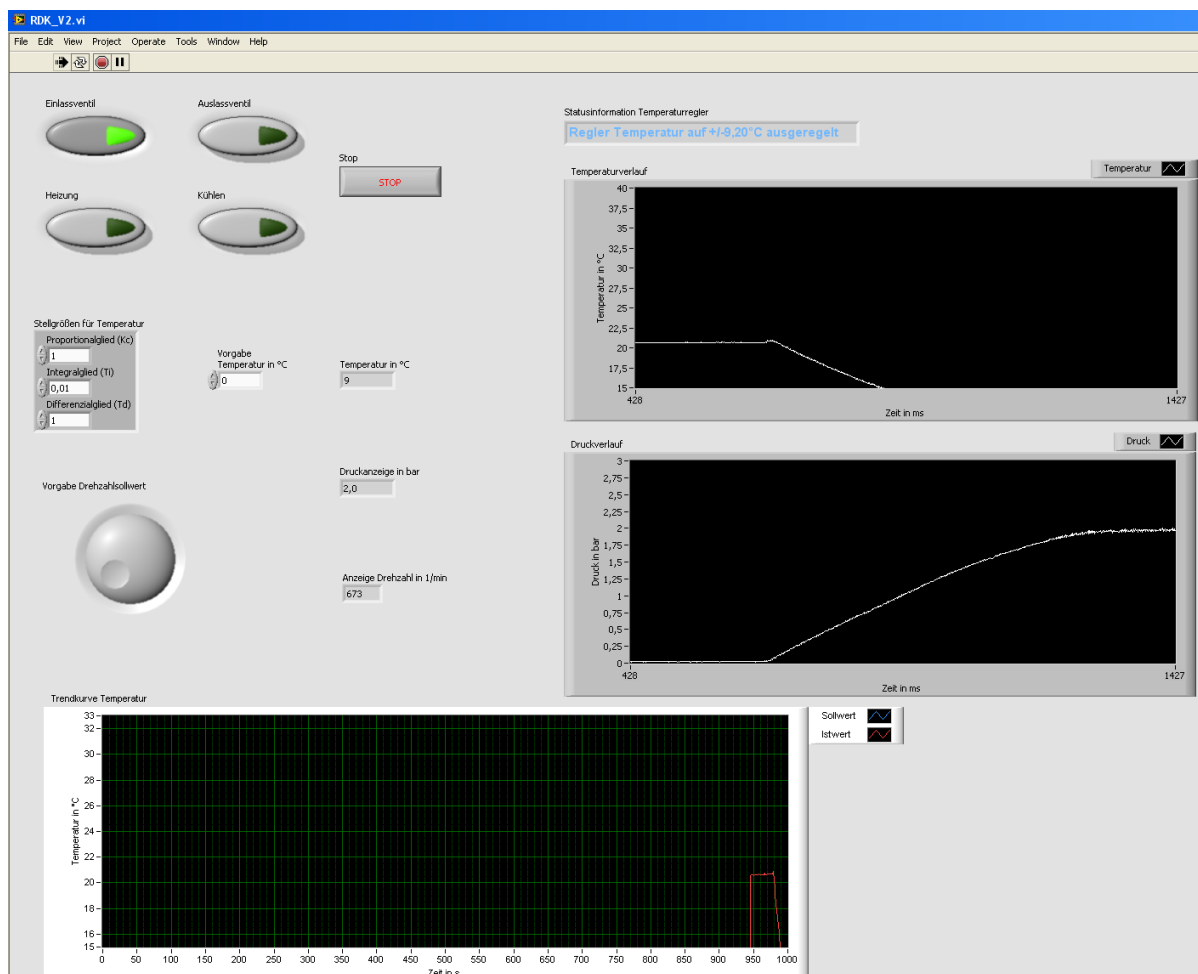


Abbildung 55: Druck aufbauen, Quelle: Eigene Darstellung.

Danach wird das Einlassventil geschlossen und mittels des Auslassventils etwas Druck aus der Druckkammer abgelassen.

11.2 Regelung der Temperatur

Im zweiten Schritt wird die Temperaturregelung für die Druckkammer aktiviert, indem eine Solltemperatur von 26 °C vorgegeben wird.

Aus der grafischen Oberfläche in Abbildung 56 kann u.a. die aktuelle Temperatur und die gewünschte Solltemperatur entnommen werden. Mittels der Trendkurve in dieser Abbildung ist sehr schön ersichtlich, wie sich die Temperatur im Inneren der Druckkammer an den vorgegebenen Sollwert, in blau dargestellt, annähert. Zusätzlich wird in der „Statusinformation Temperaturregler“ die aktuelle Abweichung der Temperatur zum gewünschten Sollwert angezeigt.

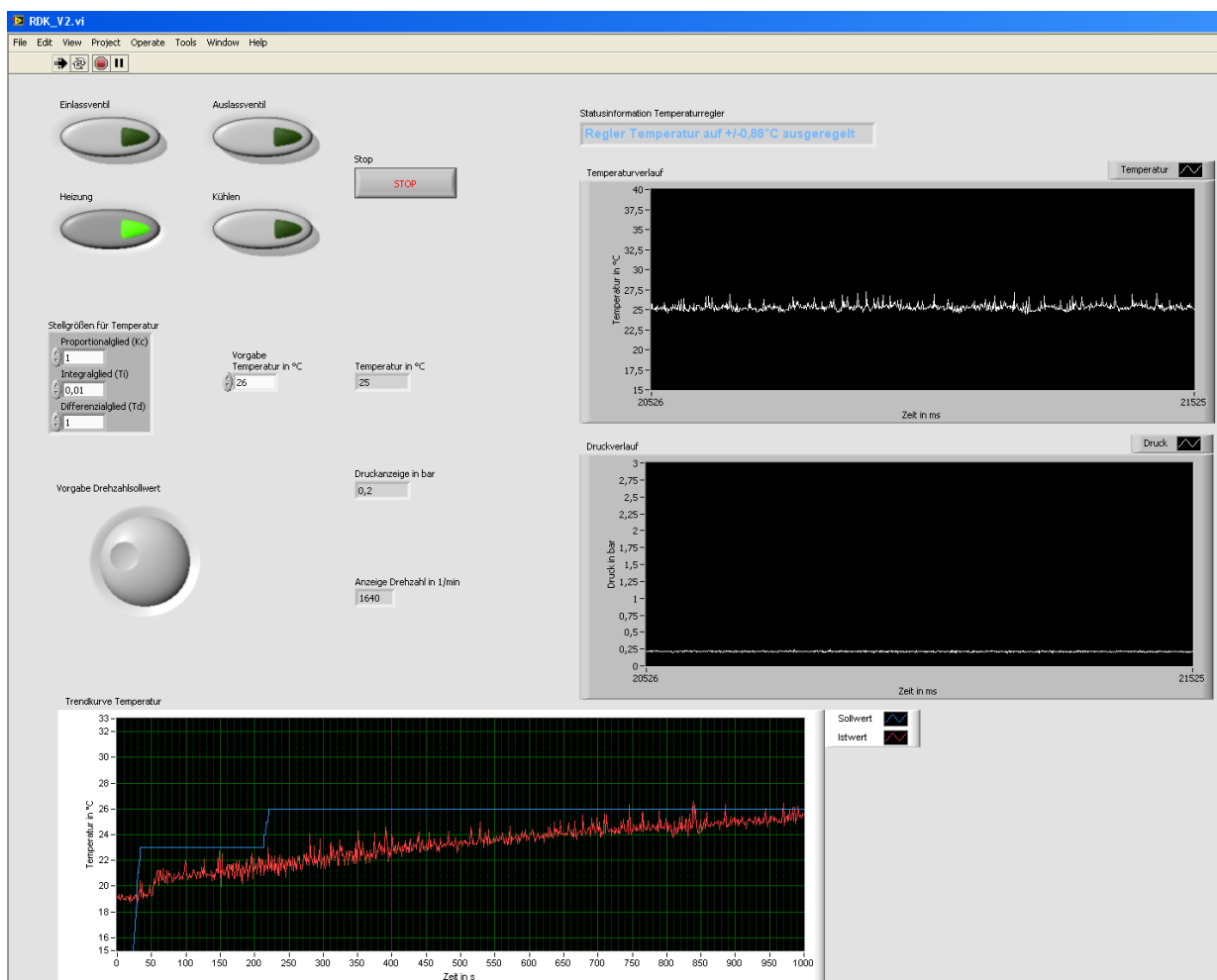


Abbildung 56: Test der Regelung der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung.

Abschließend wird ein bestimmter Druck eingestellt und die gewünschte Temperatur vorgegeben. Um das Senden der Informationen der RDK-Sensoren zum zentralen Steuergerät zu starten, wird eine Drehzahl für den Motor festgelegt. Dabei wird geprüft, ob die eingestellte Temperatur und der eingestellte Druck vom zentralen RDK-Steuergerät empfangen werden.

Test des Prüfstandes

In Abbildung 57 sind u.a. die Einstellungen der grafischen Oberfläche für diesen Test ersichtlich. Aus der Trendkurve für die Temperatur ist erkennbar, dass gegen Ende die Ist-Temperatur in rot immer wieder um den Sollwert der Temperatur in blau schwankt.

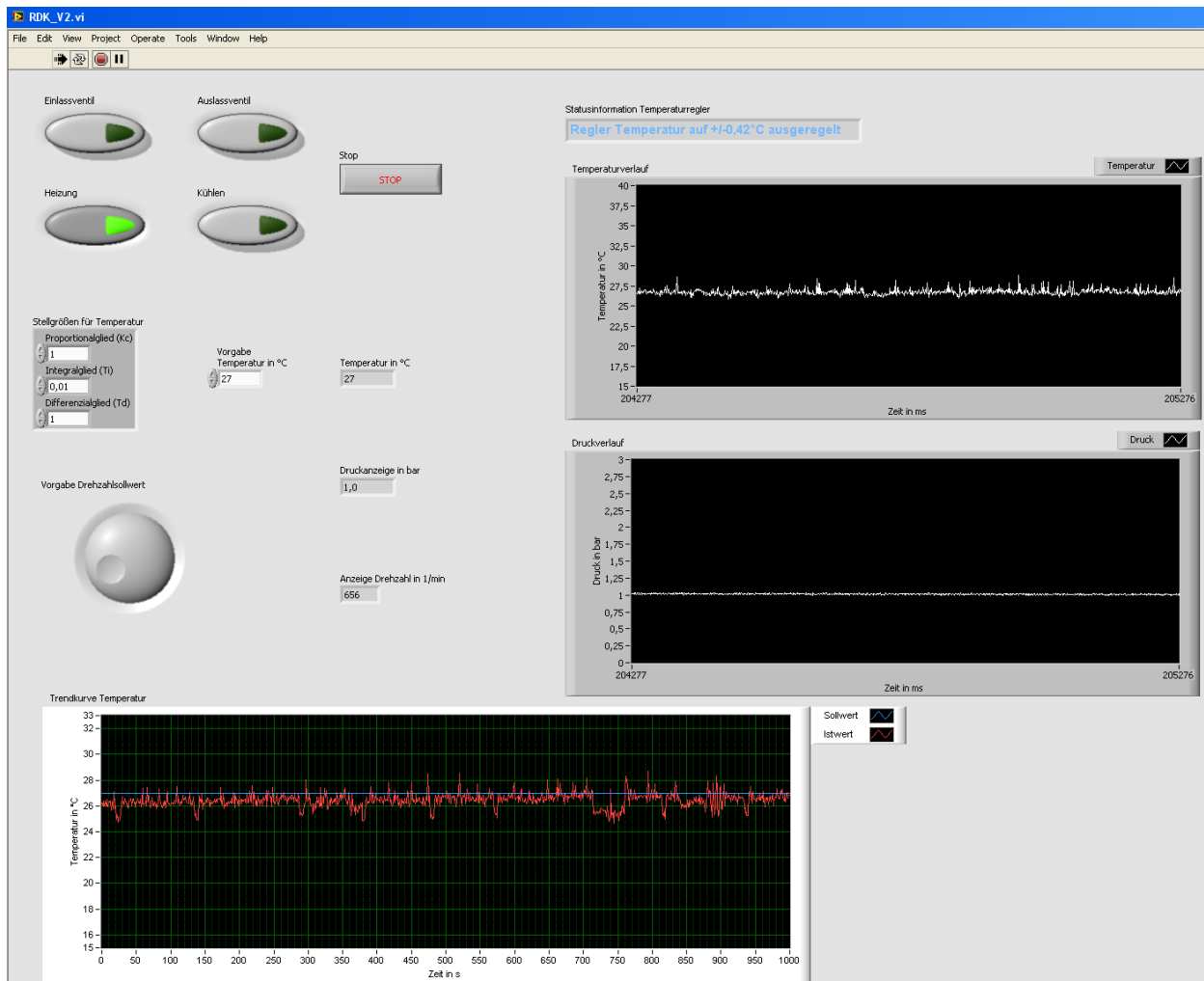


Abbildung 57: Einstellungen der grafischen Oberfläche, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus Abbildung 58 kann entnommen werden, dass die richtige Temperatur, welche auf der Oberfläche in Abbildung 57 eingestellt wird, vom zentralen RDK-Steuergerät empfangen und angezeigt wird. Zusätzlich wird auch der voreingestellte Druck von den RDK-Sensoren nahezu richtig gemessen. Der dabei gemessene Druck von 95 kPa entspricht 0,95 bar.

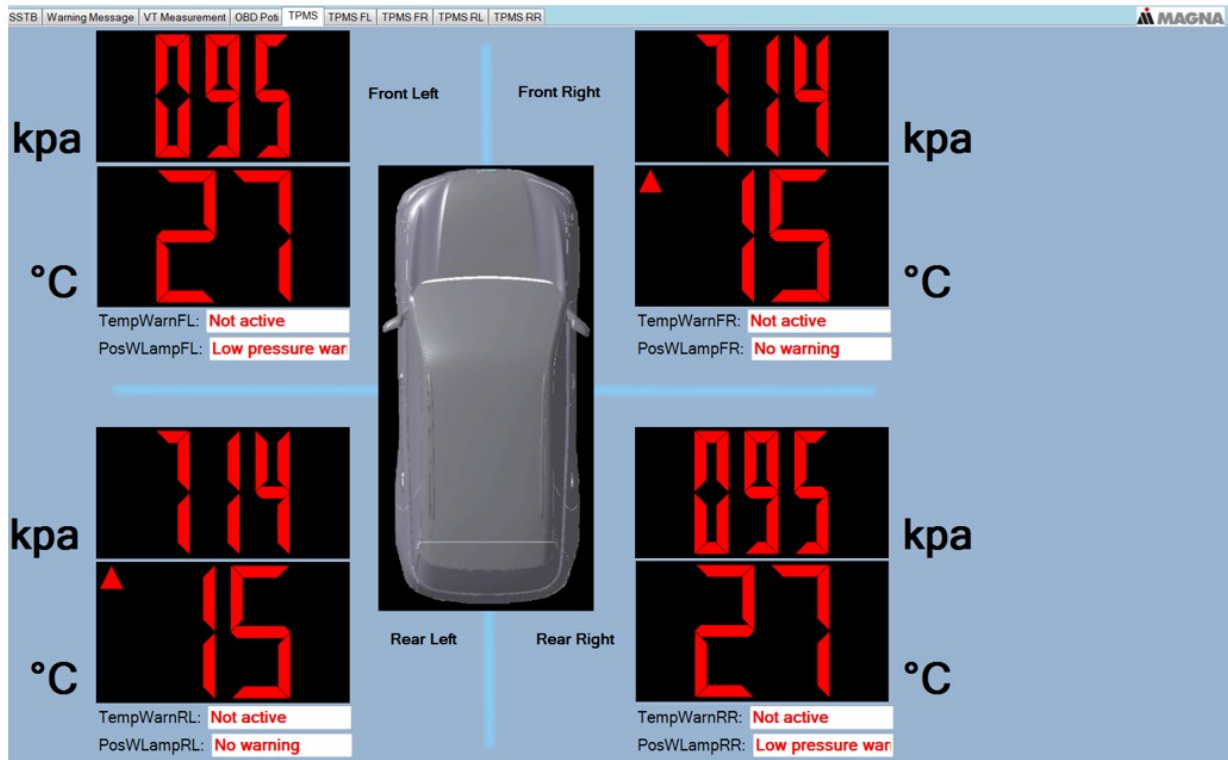


Abbildung 58: Anzeige der gemessenen Werte des RDK-Systems, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie schon im Unterkapitel 8.2 erwähnt, wurden auch bei dieser Prüfung nur der linke vordere und der rechte hintere RDK-Sensor verbaut.

11.3 Regelung des Druckes

Für die Kontrolle der Druckregelung wird mittels der grafischen Oberfläche ein gewünschter Solldruck von 0,4 bar eingestellt.

Abbildung 59 zeigt u.a. den gewünschten Solldruck sowie in der rechten unteren Ecke die Trendkurve für den Druck. Aus dieser Trendkurve kann in blau der Sollwert und in rot der Istwert für den Druck entnommen werden. Es ist erkennbar, dass sich der Istwert des Druckes immer um den Sollwert bewegt und diesem folgt. Außerdem ist durch die Trendkurve der Temperatur zu sehen, dass diese durch die Luftzufuhr immer wieder absinkt. Aus der dargestellten Statusinformation für den Druckregler kann die Abweichung zwischen dem Soll- und Istwert des Druckes entnommen werden.

Test des Prüfstandes

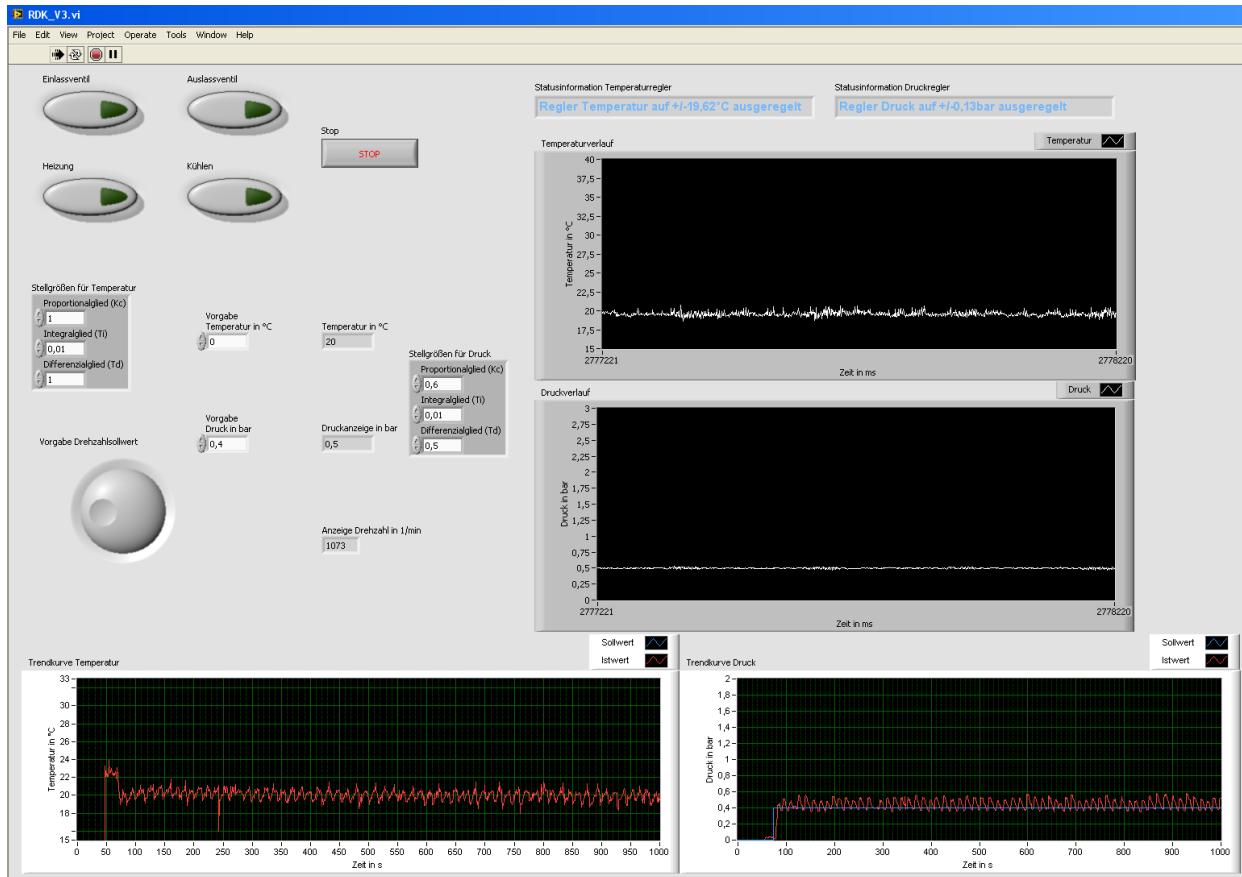


Abbildung 59: Test der Regelung des Druckes, Quelle: Eigene Darstellung.

12 ERGEBNISSE DER TESTS

Durch die in Kapitel 11 dargestellten Tests des RDK-Prüfstandes wird gezeigt, dass sowohl die Ansteuerung des Prüfstandes und auch die Regelung der Temperatur und des Druckes funktionieren.

Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass auch die Funkübertragung der RDK-Sensoren zum Steuergerät funktioniert. Somit ist auch die Ansteuerung des Motors für die RDK-Sensoren sichergestellt.

Die dargestellte Trendkurve des Druckes in Abbildung 59 zeigt, dass sich der vorgegebene Druck nicht konstant einstellt, sondern sich der Istwert des Druckes immer um den Sollwert bewegt.

Zusätzlich zu diesen Tests hat sich herausgestellt, dass für den Aufheizvorgang der Druckkammer auf ca. 40 °C eine Zeit von 45 Minuten notwendig ist. Diese, doch recht lange Zeit, kann auf eine zu dünne Isolierung der Druckkammer, aber auch auf eine zu schwache Heizmatte zurückgeführt werden. Der Versuch, die Druckkammer auf annähernd 90 °C aufzuheizen wurde nach einigen Stunden abgebrochen, da dies für den Einsatz des RDK-Prüfstandes als nicht zielführend eingestuft wurde.

Auch das teilweise starke Schwanken der Temperatur bei der Druckregelung bzw. bei Zufuhr von Luft, spielt hier eine Rolle, so dass weitere Schritte zur Verbesserung der Isolierung und Heizleistung gesetzt werden müssen.

Durch die durchgeführten Tests hat sich gezeigt, dass die eingesetzte Dichtung durch das Öffnen und Schließen des Deckels in Mitleidenschaft gezogen wird. Das bedeutet, dass die Druckkammer dadurch undicht wird und der Druck nicht mehr konstant gehalten werden kann. Weiters ist es auch nicht möglich, die Druckkammer immer prozesssicher dicht zu verschließen. D.h., dass es zumeist vom Anwender abhängt, ob die Druckkammer dicht abgeschlossen ist oder nicht.

Für die Parameter der Druck- und Temperaturregelung wurden jene Werte genommen, welche schon von LabVIEW als Standard festgelegt wurden. Lediglich bei der Druckregelung wurde versucht, diese durch das Verändern der Parameter zu beeinflussen. Da die Reglerparameter kein Hauptkriterium für diese Arbeit darstellen, wurde darauf nicht der Schwerpunkt gelegt. Die verwendeten Parameter sind jeweils aus den entsprechenden Abbildungen zu entnehmen.

13 ALTES SYSTEM VS. NEUES SYSTEM

Als Unterstützung für aktuelle Validierungen von Reifendruckkontrollsystemen gibt es einen Prüfstand, bei dem zumindest die Räder bzw. die RDK-Sensoren in Bewegung versetzt werden können.

Dieser Prüfstand inklusive der dafür verwendeten Räder in denen die RDK-Sensoren positioniert sind ist in Abbildung 60 dargestellt. Jeweils links und rechts oben bzw. links und rechts unten sind Räder inklusive RDK-Sensoren montiert. Mittels eines Gleichstrommotors werden diese Räder in Bewegung gesetzt.

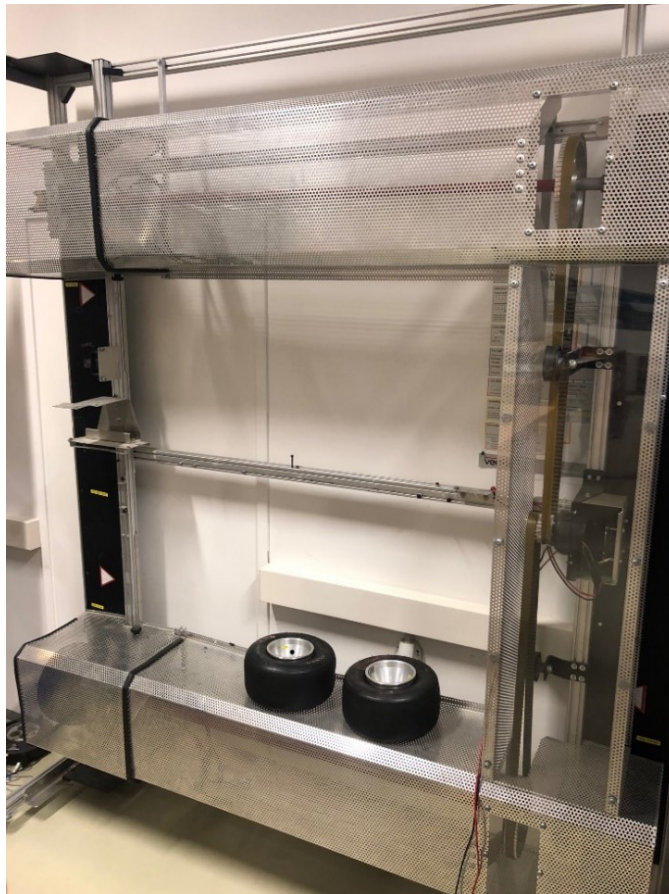


Abbildung 60: Veraltetes System, Quelle: Eigene Darstellung.

Bei diesem Prüfstand ist es jedoch nur möglich die Räder in Bewegung zu versetzen. Der Reifendruck muss jeweils händisch in jedem Reifen hergestellt werden und bedarf bei einer Veränderung immer eines recht großen Aufwandes für das Testpersonal. Weiters können die RDK-Sensoren nur mittels externer Geräte, z. B. einem Heißluftföhn, aufgeheizt werden.

Durch den Einsatz des neuen Prototypprüfstandes ergeben sich u.a. folgende Vorteile:

- Platzersparnis: Der neue Prototyp benötigt wesentlich weniger Platz als das alte System und bietet zugleich mehr Funktionalität.
- Automatisierbarkeit: Durch die Regelbarkeit der Temperatur und des Druckes des Prototyps können diese Funktionen und Prozesse automatisiert und dadurch auch die Effizienz gesteigert werden.

- Zeiteinsparung bei der Umrüstung von RDK-Sensoren: Durch den neuen Prüfstand können zwei RDK-Sensoren in ca. 10 Minuten gewechselt werden, wohingegen bei dem alten System ca. 30 Minuten pro RDK-Sensor benötigt wurden.
- Genauere Temperaturregelung: Durch die umgesetzte Temperaturregelung kann ein gewünschter Wert eingestellt und der Istwert der Temperatur einfach gemessen werden. Hierfür muss der Prüfstand in Bezug auf die Heizleistung jedoch noch verbessert werden.

14 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Masterarbeit zeigt eine Möglichkeit auf, einen Prototypprüfstand für Reifendruckkontrollsysteme umzusetzen, aufzubauen und diesen auch anzusteuern.

In dieser Arbeit wird ein Einblick in Reifendruckkontrollsysteme, die Messung von Druck, Temperatur und Drehzahl sowie Regler, vorrangig dem PID-Regler, gegeben. Durch die Erstellung eines selbstentwickelten und neuen Konzepts und der Auswahl an entsprechenden Komponenten konnte der Entwurf umgesetzt und der Prüfstand aufgebaut werden.

Im Laufe der Masterarbeit hat sich ergeben, dass es aus Gründen von fehlenden Lizenzen nicht möglich war, die Ansteuerung mit Programmen von Vector Informatik GmbH umzusetzen. Daher wurden die Ansteuerung und die Regelung des Prüfstandes mit der Software LabVIEW realisiert.

Mittels der Umsetzung einer Ansteuerung sowie auch der Druck- und Temperaturregelung für diesen Prototyp können alle notwendigen Parameter eines direkten Reifendruckkontrollsystems, wie etwa der Druck, die Temperatur und auch die Drehzahl gleichzeitig über eine grafische Oberfläche stimuliert werden. Tests haben bewiesen, dass es durch die eingesetzten PID-Regler möglich ist, den Druck und die Temperatur zu regeln. Der Motor und in weiterer Folge die RDK-Sensoren konnten durch die umgesetzte Ansteuerung in Bewegung gesetzt werden. Die Durchführung der angegebenen Tests hat außerdem gezeigt, dass mit Hilfe der eingesetzten Lambda/4-Antenne die Funkübertragung der RDK-Sensoren zum zentralen Steuergerät gegeben ist.

Es hat sich zudem herausgestellt, dass die verwendete Heizung für die gesetzten Vorgaben nicht ausreichend ist und eine Verbesserung der Heizleistung, durch den eventuellen Einsatz mehrerer Heizmatten oder einer leistungsstärkeren Heizmatte, und auch der Isolierung notwendig ist.

Durch die Konstruktion des Prüfstandes ist es möglich, die Sensoren des RDK-Systems wesentlich schneller auszutauschen als mit der bisherigen Lösung. Zusätzlich zu dieser Zeitersparnis bietet der Prüfstand den Vorteil, dass der Druck und die Temperatur geregelt und dadurch diese Prozesse in Zukunft automatisiert werden können.

Bevor es jedoch zu einem Einsatz des Prüfstandes für die Validierung von RDK-Systemen kommt, ist es erforderlich, eine Druckprüfung bis zum Maximaldruck bzw. bis zum festgelegten Maximaldruck der Druckkammer durchzuführen. Damit soll sichergestellt werden, dass es zu keinen Beschädigungen der Druckkammer, aber auch zu keinen Verletzungen bei den Anwendern des Prüfstandes kommt. Da sich gezeigt hat, dass die Umsetzung der Druckkammer sehr aufwendig und zeitintensiv ist, konnten diese Tests im Zuge dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden. Außerdem ist es für die Regelung der Temperatur und auch des Druckes erforderlich, geeignete Reglerparameter für die eingesetzten PID-Regler zu finden und zu evaluieren. Die Ermittlung dieser Reglerparameter war nicht Umfang dieser Masterarbeit und wurde nicht durchgeführt.

Sind diese beiden Punkte erfolgreich abgeschlossen, kann der Prüfstand zukünftig für die Validierung freigegeben und eingesetzt werden. Dadurch ist es in weiterer Folge möglich, die Vorteile des Prototyps in Bezug auf die Absicherung von RDK-Systemen im Vergleich zum alten System weiter zu identifizieren. Es wird angenommen, dass nicht nur die Zeit für das Testen, sondern auch die Anzahl der Prototypfahrzeuge

reduziert werden kann. Diese Annahme muss jedoch bei einem Entwicklungsprojekt in Zukunft noch geprüft werden.

Dieser Prüfstand ist im Unternehmen bereits fix für die Absicherung von Reifendruckkontrollsystemen eingeplant. Dabei gilt es jedoch noch zu klären, ob dieser Prüfstand um eine weitere Druckkammer erweitert werden soll, um die Möglichkeit zu bieten, vier RDK-Sensoren gleichzeitig abzusichern. Zudem kann in Betracht gezogen werden, ob ein alternatives Material für die Druckkammer eingesetzt bzw. getestet wird. Dies sind jedoch Punkte, welche in Zukunft erforscht werden müssen.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke

(2015): *Reifendruckkontrolle*, in: Leister, Günter (Hrsg.): *Fahrzeuigräder - Fahrzeugreifen*, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 251 - 262

Heinrich, Berthold; Schneider, Wolfgang (Hrsg.) (2019): *Grundlagen Regelungstechnik*, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

Gevatter, Hans-Jürgen (Hrsg.) (2000a): *Automatisierungstechnik 1 - Mess- und Sensortechnik*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Gevatter, Hans-Jürgen (Hrsg.) (2000b): *Automatisierungstechnik 2 - Geräte*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Faulhaber, Fritz (Hrsg.) (2019): *Gerätehandbuch*, 11. Auflage, Faulhaber, Schönaich

Bonfig, Karl-Walter (2014): *Drehzahlsensoren*, in: Tränkle, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M. (Hrsg.): *Sensortechnik*, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 775 - 792

Gaßmann, Eugen; Gries, Anna (2009): *Elektronische Druckmessung - Grundlagen, Anwendungen und Geräteauswahl*, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München

Hüning, Felix (2015): *Sensoren und Sensorschnittstellen*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston

Kraker-Paill (o.J.): *Physik, Band 1*, Verlag E. Dorner GmbH, Wien

Pauritsch, Manfred (2017): *AUS - Aktorik und Sensorik, Vorlesungsunterlage Campus02 Automatisierungstechnik SS 2018*

Sünder, Robert (o.J.): *Entwicklung eines optimierten Verfahrens zur Reifenabsicherung für indirekte Reifendruckkontrollsysteme*, Cuvillier Verlag, Göttingen

Traussnigg, Udo (2010): *Lehrbehef Regelungstechnik*, ohne Verlagsangaben, Graz

Zühlke, Andreas (2015): *Reifendruckkontrollsysteme*, 1. Auflage, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Wissenschaftliche Artikel

Bochmann, Harald; Kessler, Ralf; Schulze, Gunter (2005): *Stand und aktuelle Entwicklungen bei Reifendruck-Kontrollsystemen*, in: ATZ, 02/2005, S. 110 - 117

Osajda, Marc (2015): *Reifendruckkontrollsysteme der nächsten Generation*, in: ATZelektronik, Juli/2015, S. 48 - 51

Schuller, Paul; Bojarra, Thorsten; Henrich, Uwe; Kraus, Stephan; Burghardt, Jörg; Diederichs, Heiko (2011): *Bremsanlage, Räder und Reifendrucksensierung*, in: ATZextra, Januar/2011, S. 132 - 139

Online-Quellen

Carolus, Thomas (o.J.): *Druckmessung*

http://www.mb.uni-siegen.de/iftsm/aktuelles/messtechniklabor_v1_ws0809.pdf [Stand: 11.08.2019]

Draxler, Martin (2010): *tugraz.at*

<https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a821e15a6b&location=browse> [Stand: 15.10.2019]

Faulhaber, Fritz (2019b): *Faulhaber*

https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/DE_SC2804S_DFF.pdf [Stand: 16.10.2019]

Faulhaber, Fritz (2019a): *Faulhaber*

https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/DE_3216_BXTR_DFF.pdf [Stand: 16.10.2019]

Gibietz, Oliver (o.J.): *temperatur-profis.de*

https://temperatur-profis.de/wissen/temperaturfuehler/pt100_schaltung/ [Stand: 15.10.2019]

Güttinger, Jörg (2018): *STS Sensors*

<https://campaign.stssensors.com/blog/de/dehnungsmessstreifen-dms-druckmesstechnik> [Stand: 20.08.2019]

Hüttner, Florian (2017): *Uni Bayreuth*

http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/feld_elektrisch/faraday.htm [Stand: 22.10.2019]

Jordan, Markus (2013): *mbpassionblog*

<https://blog.mercedes-benz-passion.com/2013/11/mercedes-benz-fuehrt-serienmaessig-die-reifendruckkontrolle-ein/> [Stand: 29.07.2019]

Köllner, Christiane (2016): *Springer Professional*

<https://www.springerprofessional.de/automobilelektronik---software/fahrwerk/maengel-bei-reifendruckkontrollsystemen/11059574?searchResult=18.reifendruckkontrolle&searchBackButton=true> [Stand: 11.07.2019]

König, Peter; Lipp, Andreas (2007): *ifm.Uni-Hamburg*

<https://www.ifm.uni-hamburg.de/de/education/diver/documents-diver/ft-book/kap1-physgrund.pdf> [Stand: 11.08.2019]

Lin, David (2008): *IC Haus*

https://www.ichaus.de/upload/pdf/ei08_07_030.pdf [Stand: 09.09.2019]

Mietke, Detlef (o.J.): *Elektroniktutor.de*

<https://elektroniktutor.de/signalkunde/ask.html> [Stand: 05.08.2019]

Mietke, Detlef (o.J.): *Elektroniktutor.de*

<https://elektroniktutor.de/signalkunde/fsk.html> [Stand: 05.08.2019]

mrq (2016): *aachen.ccc.de*

<https://aachen.ccc.de/tpms/> [Stand: 31.07.2019]

Niederführ, Patrick (2018): *First Sensor*

<https://blog.first-sensor.com/de/piezoresistiver-effekt> [Stand: 20.08.2019]

o.V. (2016): *TDK Electronics*

<https://www.tdk-electronics.tdk.com/de/190976/tech-library/artikel/applications---cases/applications---cases/thermisches-management-von-halbleitern/1628982> [Stand: 27.08.2019]

o.V. (2018): *Continental Reifen*

<https://www.continental-reifen.de/autoreifen/media-services/visionzeroworld/technologie/2018-10-16-reifendruckkontrollsystem> [Stand: 11.07.2019]

o.V. (2018): *grund-wissen.de*

<https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/kinematik/kreisfoermige-bewegungen.html> [Stand: 30.08.2019]

o.V. (2018): *Kompendium*

https://kompendium.infotip.de/hall_sensor.html [Stand: 09.09.2019]

o.V. (2019): *Rhein Tacho*

<https://www.rheintacho.de/basiswissen/drehzahlsensoren/> [Stand: 09.09.2019]

o.V. (o.J.): *chemgapedia.de*

http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/vlus/druck_mess.vlu/Page/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/druck/piezo_verfahren.vscml.html [Stand: 20.08.2019]

o.V. (o.J.): *chemie.de*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/temperatur-und-temperaturmessung> [Stand: 20.08.2019]

o.V. (o.J.): *Chemie.de*

<https://www.chemie.de/lexikon/Temperatur.html> [Stand: 20.08.2019]

o.V. (o.J.): *Chemie.de*

<https://www.chemie.de/lexikon/Diffusion.html> [Stand: 19.06.2019]

o.V. (o.J.): *kukla-spedition.com*

<http://files.kukla-spedition.com/Temperaturtabelle.pdf> [Stand: 25.08.2019]

o.V. (o.J.): *ÖAMTC*

<https://www.oeamtc.at/thema/techniktipps/reifendruck-kontrollsysteme-seit-2014-pflicht-bei-neuwagen-16185008> [Stand: 11.07.2019]

o.V. (o.J.): *Sofatutor.at*

<https://www.sofatutor.at/physik/mechanik/physik-der-fluessigkeiten-und-gase/druck-messung-und-anwendung> [Stand: 11.08.2019]

o.V. (o.J.): *Temperatur Messelemente Hettstedt GmbH*

<https://www.temperaturmesstechnik.de/de/service/temperaturmessung-mit-pt100.html> [Stand: 27.08.2019]

o.V. (o.J.): *umrechnung.org*

<https://www.umrechnung.org/masseinheiten-temperatur-celsius-fahrenheit-kelvin/celsius-fahrenheit-umrechnung.htm> [Stand: 25.08.2019]

o.V. (o.J.): *Uni Wien*

<https://www.univie.ac.at/video/grundlagen/signalcodierung.htm> [Stand: 05.08.2019]

o.V. (2011): *Electronic-Sensor.de*

https://www.electronic-sensor.de/attachments/article/68/ti-5_kennlinien-pt100-widerstaende-nach-toleranzklassen.pdf [Stand: 15.10.2019]

o.V. (o.J.): *RS Online*

<https://at.rs-online.com/web/p/platin-temperatursensoren/2371663/> [Stand: 16.10.2019]

o.V. (o.J.): *RS Online*

<https://at.rs-online.com/web/p/drucksensoren/1365065/> [Stand: 15.10.2019]

o.V. (2019): *Mass Flow*

<https://www.massflow-online.com/faqs/accuracy-full-scale-vs-reading/> [Stand: 16.10.2019]

o.V. (o.J.): *Faulhaber*

<https://www.faulhaber.com/de/produkte/serie/3216bxtr/> [Stand: 16.10.2019]

o.V. (o.J.): *RS Online*

<https://at.rs-online.com/web/p/silikon-heizmatten/0731372/?relevancy-data=636F3D3126696E3D4931384E525353746F636B4E756D626572266C753D656E266D6D3D6D61746368616C6C26706D3D5E2828282872737C5253295B205D3F293F285C647B337D5B5C2D5C735D3F5C647B332C347D5B705061415D3> [Stand: 18.10.2019]

o.V. (2019a): *National Instruments*

<https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/11/pressure-measurement-overview.html> [Stand: 11.08.2019]

o.V. (2019b): *National Instruments*

<https://www.ni.com/de-at/shop/labview.html> [Stand: 18.10.2019]

o.V. (2019c): *National Instruments*

<https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/13/benefits-of-programming-graphically-in-ni-labview.html> [Stand: 18.10.2019]

o.V. (2019d): *National Instruments*

<http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/d/environment> [Stand: 18.10.2019]

o.V. (2019e): *National Instruments*

<https://www.ni.com/de-at/innovations/white-papers/06/introduction-to-data-acquisition.html#section-452683123> [Stand: 20.10.019]

o.V. (2019f): *National Instruments*

<http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/d/pci-pxi> [Stand: 20.10.2019]

o.V. (2019g): *National Instruments*

<http://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/pci-mio-16xe-10/overview/> [Stand: 20.10.2019]

o.V. (o.J.): *Hochschule münchen*

<http://w3-o.hm.edu/home/fb/fb05/akrt/Messtechnik/hp/kap7.pdf> [Stand: 21.10.2019]

o.V. (o.J.): *Conrad*

<https://www.conrad.at/de/p/enda-mu-pt100-u010-0-200-temperatur-messumformer-fuer-pt-100-mu-pt100-u010-0-200-198878.html> [Stand: 21.10.2019]

o.V. (2019a): *Elektronik Kompendium*

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1404141.htm> [Stand: 20.08.2019]

o.V. (2019d): *Elektronik Kompendium*

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0810171.htm> [Stand: 23.10.2019]

o.V. (2019c): *Elektronik Kompendium*

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0208031.htm> [Stand: 27.08.2019]

o.V. (2019b): *Elektronik Kompendium*

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0111051.htm> [Stand: 27.08.2019]

o.V. (2019): *IT Wissen*

<https://www.itwissen.info/Antenne-antenna.html> [Stand: 23.10.2019]

o.V. (2010a): *Lernhelfer.de*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/der-druck> [Stand: 11.08.2019]

o.V. (2010b): *Lernhelfer.de*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/teilchenmodell> [Stand: 11.08.2019]

o.V. (2010c): *lernhelfer.de*

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/temperatur-und-temperaturmessung> [Stand: 20.08.2019]

o.V. (o.J.): *Sofatutor.at*

<https://www.sofatutor.at/physik/mechanik/physik-der-fluessigkeiten-und-gase/druck-messung-und-anwendung> [Stand: 27.08.2019]

o.V. (o.J.): *Datenblatt Pt100 - RS Online*

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/15bb/0900766b815bb4fc.pdf> [Stand: 15.10.2019]

o.V. (o.J.): *Datenblatt Magnetventil - RS Online*

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/15dd/0900766b815dd857.pdf> [Stand: 16.10.2019]

o.V. (o.J.): *Datenblatt Heizmatte - RS Online*

<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1507/0900766b8150705a.pdf> [Stand: 17.10.2019]

o.V. (o.J.): *Datenblatt Drucksensor - Gems Sensors*

https://www.gemssensors.de/~media/files/resources/na_english/catalogpages/catalog-h_3100series-3200series.ashx [Stand: 16.10.2019]

o.V. (2014): *Datenblatt Messumformer - Conrad*

https://produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/198878-da-01-de-MESSUMFORMER_0_10V__MU_PT100_U010.pdf [Stand: 21.10.2019]

Weimer, Simon (2018): *Trafag.de*

<https://blog.trafag.de/drucksensor-funktionsweise#Die%20Dickschicht-auf-Keramik%20Technologie>
[Stand: 20.08.2019]

Wiesinger, Johannes (o.J.): *KFZ-Tech*

<https://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/reifen/rdks.htm> [Stand: 13.07.2019]

Wülfing, Andreas (2002): *KEM Konstruktion*

<https://kem.industrie.de/allgemein/sicher-im-gruenen-bereich/> [Stand: 20.08.2019]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Funktion des indirekten RDK-Systems, Quelle: Leister (Hrsg.) (2015), S. 255. | 6 |
| Abbildung 2: Direkter RDK-Sensor mit Luftventil, Quelle: Wiesinger (o.J.), Online-Quelle [13.07.2019]. ... | 7 |
| Abbildung 3: Positionszuordnung der Luftdrücke, Quelle: Jordan (2013), Online-Quelle [29.07.2019]. | 8 |
| Abbildung 4: Warnszenarien, Quelle: Leister (Hrsg.) (2015), S. 261. | 10 |
| Abbildung 5: Systemkomponenten, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 113. | 11 |
| Abbildung 6: Montageposition der Radelektronik, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 114. ... | 12 |
| Abbildung 7: Prinzipdarstellung der Radelektronik, Quelle: Zühlke (2015), S. 30 (leicht modifiziert). | 12 |
| Abbildung 8: Prinzipdarstellung der Druckmessmethoden, Quelle: www.ni.com (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019] (leicht modifiziert). | 16 |
| Abbildung 9: Aufbau von Druckmesseinrichtungen nach DIN 16086, Quelle: Gevatter (Hrsg.) (2000), S. 62. | 17 |
| Abbildung 10: Longitudinal und transversal wirkendes Piezoelement, Quelle: www.chemgapedia.de (o.J.), Online-Quelle [11.08.2019]. | 19 |
| Abbildung 11: Verformung bei der resistiven Druckmessung, Quelle: Gaßmann/Gries (2009), S. 10 (leicht modifiziert). | 19 |
| Abbildung 12: Messprinzip des kapazitiven Druckaufnehmers, Quelle: Gaßmann/Gries (2009), S. 12 (leicht modifiziert). | 20 |
| Abbildung 13: Widerstandskennlinie eines Kaltleiters, Quelle: www.tdk-electronics.tdk.com (2016), Online-Quelle [27.08.2019] (leicht modifiziert). | 23 |
| Abbildung 14: Widerstandskennlinie eines Heißeleiters, Quelle: www.tdk-electronics.tdk.com (2016), Online-Quelle [27.08.2019]. | 24 |
| Abbildung 15: Thermoelement, Quelle: Gevatter (Hrsg.) (2000), S. 206. | 25 |
| Abbildung 16: Drehzahlmessung mittels Hallsensor, Quelle: Lin (2008), Online-Quelle [09.09.2019]. | 28 |
| Abbildung 17: Steuerung der Raumtemperatur, Quelle: Traussnigg (2010), S. 1. | 30 |
| Abbildung 18: Steuerung der Raumtemperatur unter Berücksichtigung einer Störgröße, Quelle: Traussnigg (2010), S. 2. | 30 |
| Abbildung 19: Regelung der Raumtemperatur, Quelle: Traussnigg (2010), S. 3. | 31 |
| Abbildung 20: Regelung der Raumtemperatur unter Berücksichtigung einer Störgröße, Quelle: Traussnigg (2010), S. 3. | 32 |
| Abbildung 21: Grundstruktur eines Regelkreises, Quelle: Traussnigg (2010), S. 22 (leicht modifiziert). .. | 32 |
| Abbildung 22: Blockschaltbild eines PID-Reglers, Quelle: Traussnigg (2010), S. 31. | 33 |
| Abbildung 23: Konzept der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung. | 36 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 24: Pt100-Widerstandstemperaturfühler, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]..... | 38 |
| Abbildung 25: Verbindung Pt100 zu Messumformer, Quelle: In Anlehnung an www.hm.edu (o.J.), Online-Quelle [21.10.2019]..... | 38 |
| Abbildung 26: Messumformer, Quelle: www.conrad.at (o.J.), Online-Quelle [21.10.2019]. | 39 |
| Abbildung 27: Gems Drucksensor, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]. | 41 |
| Abbildung 28: Faulhaber DC-Flachmotor, Quelle: www.faulhaber.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]. | 42 |
| Abbildung 29: Kennlinie für die Sollwertvorgabe, Quelle: In Anlehnung an Faulhaber (Hrsg.) (2019), S. 43. | 43 |
| Abbildung 30: Programmieradapter und Speed Controller, Quelle: www.faulhaber.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]..... | 43 |
| Abbildung 31: Magnetventil, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]. | 44 |
| Abbildung 32: Heizmatte, Quelle: www.at.rs-online.com (o.J.), Online-Quelle [18.10.2019]..... | 45 |
| Abbildung 33: While-Schleife im Blockdiagramm, Quelle: www.ni.com (2019c), Online-Quelle [18.10.2019]..... | 46 |
| Abbildung 34: Frontpanel und Elementepalette, Quelle: Eigene Darstellung. | 47 |
| Abbildung 35: Multiplikation in LabVIEW, Quelle: Eigene Darstellung. | 48 |
| Abbildung 36: Bestandteile eines DAQ-Systems, Quelle: www.ni.com (2019f), Online-Quelle [20.10.2019] (leicht modifiziert). | 49 |
| Abbildung 37: SCB-68, Quelle: Eigene Darstellung. | 49 |
| Abbildung 38: Vorderansicht der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung. | 52 |
| Abbildung 39: Draufsicht der Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung. | 53 |
| Abbildung 40: Geschlossene Druckkammer, Quelle: Eigene Darstellung. | 54 |
| Abbildung 41: Druckkammer ohne Deckel, Quelle: Eigene Darstellung. | 55 |
| Abbildung 42: Prinzip der Ladungsverschiebung im Faraday'schen Käfig, Quelle: Hüttner (2017), Online-Quelle [22.10.2019]..... | 56 |
| Abbildung 43: Manometer und Kugelhahn, Quelle: Eigene Darstellung. | 58 |
| Abbildung 44: Anzeige erste Versuchsmessung, Quelle: Eigene Darstellung..... | 60 |
| Abbildung 45: Antriebskonfigurationen im Motion Manager, Quelle: Eigene Darstellung. | 62 |
| Abbildung 46: Messwert des AI0s, Quelle: Eigene Darstellung. | 63 |
| Abbildung 47: Prototyp des RDK-Prüfstandes, Quelle: Eigene Darstellung. | 64 |
| Abbildung 48: Grafische Oberfläche für den RDK-Prüfstand, Quelle: Eigene Darstellung. | 65 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 49: Einlesen der Druck- und Temperaturmesswerte, Quelle: Eigene Darstellung. | 66 |
| Abbildung 50: Ansteuerung der Magnetventile und der Heizung, Quelle: Eigene Darstellung..... | 67 |
| Abbildung 51: Vorgabe und Anzeige der Drehzahl, Quelle: Eigene Darstellung. | 68 |
| Abbildung 52: Regelung der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung. | 69 |
| Abbildung 53: Regelung des Druckes, Quelle: Eigene Darstellung. | 70 |
| Abbildung 54: Regelung und Trendkurve für den Druck, Quelle: Eigene Darstellung. | 70 |
| Abbildung 55: Druck aufbauen, Quelle: Eigene Darstellung. | 71 |
| Abbildung 56: Test der Regelung der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung. | 72 |
| Abbildung 57: Einstellungen der grafischen Oberfläche, Quelle: Eigene Darstellung. | 73 |
| Abbildung 58: Anzeige der gemessenen Werte des RDK-Systems, Quelle: Eigene Darstellung. | 74 |
| Abbildung 59: Test der Regelung des Druckes, Quelle: Eigene Darstellung..... | 75 |
| Abbildung 60: Veraltetes System, Quelle: Eigene Darstellung. | 77 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Datentelegramm des Reifendrucksensors, Quelle: Bochmann/Kessler/Schulze (2005), S. 112 (leicht modifiziert). | 14 |
| Tabelle 2: Temperaturtabelle, Quelle: In Anlehnung an www.kukla-spedition.com (o.J.), Onlinequelle [25.08.2019]. | 22 |
| Tabelle 3: Daten des Pt100-Widerstandsthermometers, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Pt100 – RS Online (o.J.), Online-Quelle [15.10.2019]. | 37 |
| Tabelle 4: Daten des Messumformers, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Messumformer – Conrad (2014), Online-Quelle [21.10.2019]. | 39 |
| Tabelle 5: Daten des Drucksensors, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Drucksensor – Gems Sensors (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]. | 40 |
| Tabelle 6: Daten des Servomotors, Quelle: In Anlehnung an Faulhaber (2019a), Online-Quelle [16.10.2019]. | 41 |
| Tabelle 7: Daten der Magnetventile, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Magnetventil – RS Online (o.J.), Online-Quelle [16.10.2019]. | 44 |
| Tabelle 8: Daten der Heizmatte, Quelle: In Anlehnung an Datenblatt Heizmatte – RS Online (o.J.), Online-Quelle [17.10.2019]. | 45 |
| Tabelle 9: Übersicht der benötigten Ein- und Ausgänge, Quelle: Eigene Darstellung. | 50 |
| Tabelle 10: Anschlussbelegung SCB-68, Quelle: Eigene Darstellung. | 63 |
| Tabelle 11: Anschlussbelegung 1, Quelle: Eigene Darstellung. | 92 |
| Tabelle 12: Anschlussbelegung 2, Quelle: Eigene Darstellung. | 93 |
| Tabelle 13: Anschlussbelegung 3, Quelle: Eigene Darstellung. | 94 |

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|-----|------------------------------------|
| ABS | Antiblockiersystem |
| ASK | Amplitude Shift Keying |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CAN | Controller Area Network |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| DAQ | Data Acquisition |
| DMS | Dehnmessstreifen |
| ESP | Elektronisches Stabilitätsprogramm |
| FS | Full Scale |
| FSK | Frequency Shift Keying |
| I/O | Input/Output |
| LIN | Local Interconnect Network |
| LSB | Least Significant Bit |
| MSB | Most Significant Bit |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| RDK | Reifendruckkontroll |
| SI | Système international d'unités |
| VI | Virtuelle Instrumente |

ANHANG 1: ANSCHLUSSBELEGUNG

Aus Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 kann die Anschlussbelegung der eingesetzten Komponenten des RDK-Prüfstandes entnommen werden. Zusätzlich zu der Angabe des Pins und der Bezeichnung sind auch die Erklärung sowie das entsprechende Ziel, also wo der entsprechende Pin angeschlossen wird, ersichtlich.

| Komponente | Pin | Bezeichnung | Erklärung | Anschluss an |
|-------------------------------|-----|--------------------------|---|----------------------------------|
| DC Motor | 1 | Mot C | Versorgung Mot C | Pin 9, Speed Controller |
| | 2 | Mot B | Versorgung Mot B | Pin 10, Speed Controller |
| | 3 | Mot A | Versorgung Mot C | Pin 11, Speed Controller |
| | 4 | SGND | Masseanschluss Signal | Pin 12, Speed Controller |
| | 5 | VCC | Versorgung ext. Verbraucher | Pin 13, Speed Controller |
| | 6 | Sens C | Sensoreingang C | Pin 14, Speed Controller |
| | 7 | Sens B | Sensoreingang B | Pin 15, Speed Controller |
| | 8 | Sens A | Sensoreingang A | Pin 16, Speed Controller |
| SC2804 Speed Controller | 1 | Up | Versorgung Elektronik | 12 V |
| | 2 | Umot | Versorgung des Motors | 12 V |
| | 3 | GND | Masse, gemeinsam | GND |
| | 4 | Unsoll | Steuerspannung für Solldrehzahl | Pin 21 (AO1), SCB-68 |
| | 5 | DIR digitaler Eingang | Vorgabe für die Drehrichtung | GND (für linksdrehend) |
| | 6 | FG digitaler Ausgang | Frequenzausgang für die Ermittlung der IST-Drehzahl | Pin 3 (CTR 0), SCB-68 |
| | 7 | IO1 | ohne Verwendung | - |
| | 8 | IO2 | ohne Verwendung | - |
| Drucksensor | 1 | IN (+) | Versorgung | 12 V |
| | 2 | GND | GND | GND |
| | 3 | 0V | Druckausgang 0-10V | Pin 31 (AI10), SCB-68 |
| | 4 | N/C | not connected | - |
| Heizmatte | 1 | Versorgung | Versorgung | Pin 11, Relais Heizmatte 12 V |
| | 2 | GND | GND | GND |
| Temperatur- sensor Pt100 | 1 | Leitung 1 | - | Pin 1 + 2, Messumformer |
| | 2 | Leitung 2 | - | Pin 3 Messumformer |

Tabelle 11: Anschlussbelegung 1, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang 1: Anschlussbelegung

| Komponente | Pin | Bezeichnung | Erklärung | Anschluss an |
|-----------------------------|-----|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Messumformer | 1 | Pt100 - Leitung 1 | Brücke zu Pin 2 bei 2-Leiter Pt100 | Pin 2 Messumformer |
| | 2 | Pt100 - Leitung 2 | Pt100 - Leitung 1 | Pin 1, Pt100 |
| | 3 | Pt100 - Leitung 3 | Pt100 - Leitung 2 | Pin 2, Pt100 |
| | 4 | Analog Ausgang | Analog Ausgang | Pin 68 (AI0), SCB-68 |
| | 5 | GND | GND | GND |
| | 6 | Versorgung | Versorgung | 12 V |
| Luftventil Einlass | 1 | Versorgung | - | Pin 11, Relais Einlassventil |
| | 2 | GND | - | GND |
| Luftventil Auslass | 1 | Versorgung | - | Pin 11, Relais Auslassventil |
| | 2 | GND | - | GND |
| Relais Heizmatte 5 V | A1 | Versorgung | Versorgung Spule | Pin 52 (P0.0), SCB-68 |
| | A2 | GND | - | GND |
| | 11 | Anschluss | Gemeinsamer Anschluss | Pin A1, Relais Heizmatte 12 V |
| | 14 | Schließer | Versorgung Heizmatte | 12 V |
| Relais Heizmatte 12 V | A1 | Versorgung | Versorgung Spule | Pin 11, Relais Heizmatte 5 V |
| | A2 | GND | - | GND |
| | 11 | Anschluss | Gemeinsamer Anschluss | Pin 1, Heizmatte |
| | 14 | Schließer | Versorgung Heizmatte | 12 V |
| Relais Einlassventil | A1 | Versorgung | Versorgung Spule | Pin 17 (P0.1), SCB-68 |
| | A2 | GND | - | GND |
| | 11 | Anschluss | Gemeinsamer Anschluss | Pin 1, Luftventil Einlass |
| | 14 | Schließer | Versorgung Einlassventil | 12 V |
| Relais Auslassventil | A1 | Versorgung | Versorgung Spule | Pin 49 (P0.2), SCB-68 |
| | A2 | GND | - | GND |
| | 11 | Anschluss | Gemeinsamer Anschluss | Pin 1, Luftventil Auslass |
| | 14 | Schließer | Versorgung Auslassventil | 12 V |

Tabelle 12: Anschlussbelegung 2, Quelle: Eigene Darstellung.

| Komponente | Pin | Bezeichnung | Erklärung | Anschluss an |
|------------|-----|-------------|---|------------------------------|
| SCB-68 | 21 | AO1 | Steuerspannung für Solldrehzahl | Pin 4, Speed Controller |
| | 68 | AI0 | Analog Ausgang, Messumformer | Pin 4, Messumformer |
| | 31 | AI10 | Druckausgang 0-10V | Pin 3, Drucksensor |
| | 52 | P0.0 | Versorgung Spule, Relais Heizmatte 5 V | Pin A1, Relais Heizmatte 5 V |
| | 17 | P0.1 | Versorgung Spule, Relais Einlassventil | Pin A1, Relais Einlassventil |
| | 49 | P0.2 | Versorgung Spule, Relais Auslassventil | Pin A1, Relais Auslassventil |
| | 47 | CTR 0 | Frequenzausgang für die Ermittlung der IST-Drehzahl | Pin 6, Speed Controller |

Tabelle 13: Anschlussbelegung 3, Quelle: Eigene Darstellung.