Diplomarbeit

Auswertegerät



zu

DIGI SENS KL66 Lastmesssensor



Diplomand	**Daniel Renggli**
Höhere Fachschule	**TEKO Luzern**
Klasse	**L-TEL-23-Mo-a**
Fachrichtung	**Dipl. Elektrotechniker HF**
Ort, Datum	**Luzern, 09.11.2026**

INHALTSVERZEICHNIS

MANAGEMENT SUMMARY 5

VORSTELLUNG 6

BERUFLICHER WERDEGANG 6
EMCH AUFZÜGE AG 7
FIRMENGESCHICHTE 7
TÄTIGKEITSBEREICH 7
BESONDERHEITEN 8

LASTMESSUNG AN AUFZÜGEN 9

LASTMESSVERFAHREN 9
RISIKEN UND NACHTEILE OHNE LASTMESSUNG 10

PROJEKTINITIALISIERUNG 11

PROJEKTEINGABE 11
THEMA 11
ZIEL 11
KUNDE 11
SINN UND ZWECK 11
ENDERGEBNIS 12
SOFTWARE / FIRMWARE 12
ERFOLGSKRITERIEN 12

LASTENHEFT 13

AUSGANGSLAGE 13
PROBLEMSTELLUNG 13
ZIEL DES PROJEKTS 13
SOLLZIELE 14
WUNSCHZIELE 16
ABGRENZUNG DES PROJEKTS 16
FREIGABE LASTENHEFT 17

PFLICHTENHEFT 18

PROJEKTORGANISATION 18
PROJEKTSTRUKTURPLAN 19
GANNT DIAGRAMM 20
FINANZIERUNG 22

SWOT-ANALYSE **23**
SYSTEMÜBERSICHT **25**
FUNKTIONSBESCHREIBUNG **26**
ELEKTRISCHER AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE 26
ANZEIGE UND BEDIENUNG 27
DIGITALE AUSGÄNGE UND RELAIS 27
WARTUNG UND KOMMUNIKATION 27
LEITERPLATTE UND MECHANISCHER AUFBAU 28
GEHÄUSE 28
KONZEPTVISUALISIERUNG AUSWERTEGERÄT **29**
TESTKONZEPT **30**
TESTVERFAHREN UND ERPROBUNG DES AUSWERTEGERÄTS 30
PHASE 1 – ERPROBUNG DES PROTOTYPS MIT EINEM MOBILEN TESTAUFBAU 30
PHASE 2 – PRAXISERPROBUNG AN EINER REALEN AUFZUGSANLAGE 31
KONZEPTVISUALISIERUNG TESTAUFBAU **32**
LEISTUNGSVERZEICHNIS **33**
ABNAHMEKRITERIEN UND BEWERTUNG **33**
FREIGABE PFLICHTENHEFT **34**

PROJEKTREALISIERUNG **35**

MS1 ENTWICKLUNG PCB **35**
ARDUINO UNO R4 WIFI 35
RASPBERRY PI PICO 2 W 37
OLED 40
KLEINBAUTEILE PCB 40
SCHEMA TINA-TI 41
SCHEMA KICAD 41
EINSPEISUNG 42
MIKROCONTROLLER 43
RELAISSTUFE 43
BERECHNUNGEN **44**
VORWIDERSTAND STATUS-LED 24V 44
VORWIDERSTAND STAUS-LED 5V 44
VORWIDERSTAND STAUS-LED WIFI 44
PULL-UP-WIDERSTÄNDE BEDIENTASTEN 45
PULL-UP-WIDERSTÄNDE I^2C / OPTOKOPPLER 45
VORWIDERSTAND OPTOKOPPLER 46
LEISTUNGSBILANZ PCB 47
FOOTPRINTS 48
GEHÄUSE 48
DISPOSITION PCB 49
LAGENAUFBAU 49
ROUTING 50
3D ANSICHT PCB 50

MS2 HERSTELLUNG TESTAUFBAU 51
ERSTELLUNG SKIZZEN 51
ZUGKRAFTEINRICHTUNG 52
2. MESSSYSTEM 53
ZUSAMMENBAU 53
MS3 ENTWICKLUNG SOFTWARE 55
ENTWICKLUNGSUMGEBUNG 55
KALIBRIERUNGSVERFAHREN 56
LINEARE MEHRPUNKTKALIBRIERUNG 56
QUADRATISCHE KENNLINIENKALIBRIERUNG 57
VERGLEICHSMESSUNG 59
SOFTWARESTRUKTUR 61
HAUPTPROGRAMM AUSWERTEGERAET_DIGI_SENS_KL66_V01.00.INO 62
SENSORMODUL SENSOR.H / SENSOR.CPP 62
KALIBRIERUNGSMODUL CALIBRATION.H / CALIBRATION.CPP 63
SCHALTPUNKTMODUL SWITCHPOINTS.H / SWITCHPOINTS.CPP 64
SPEICHERMODUL STORAGE.H / STORAGE.CPP 64
ANZEIGEMODUL DISPLAY.H / DISPLAY.CPP 64
TASTENMODUL BUTTONS.H / BUTTONS.CPP 65
WEBSERVERMODUL WEBSERVER.H / WEBSERVER.CPP 65
WLAN-MODUL WLAN.H / WLAN.CPP 66
AUSGANGSMODUL OUTPUTS.H / OUTPUTS.CPP 66
MENÜSTEUERUNG MENU.H / MENU.CPP 66
MENÜSTRUKTUR 67
WEBINTERFACE 68
MS4 TESTPHASE 1 69
ZIEL UND ZWECK 69
MESSERGEBNISSE 5MM FLACHEISEN 69
MESSERGEBNISSE 8MM / 10MM FLACHEISEN 70
DINACELL MESSSYSTEM 73
MS5 TESTPHASE 2 75
ZIEL UND ZWECK 75
TESTANLAGE 75
MESSPUNKT MOTORENTRÄGER 76
MESSPUNKT KABINENBODEN 77
MESSERGEBNISSE 79
MONTAGE DES SENSORS 81
CONTROLLING MEILENSTEINE 83
MS1 83
MS2 85
MS3 86
MS4 88
MS5 89

PROJEKTABSCHLUSS **90**

FAZIT **90**
KL66 SENSOR 90
AUSWERTEEINHEIT 91
SCHLUSSABRECHNUNG **92**
ZIELERREICHUNG **94**
REFLEXION **98**
LESSONS LEARNED **99**
EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG **100**
VERDANKUNG **100**
BEGRIFFSVERZEICHNIS **101**
ABBILDUNGSVERZEICHNIS **103**
TABELLENVERZEICHNIS **104**
QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS **104**

ANHANG **105**

BEDIENUNGSANLEITUNG **105**
DATENBLATT DIGI SENS KL66 **109**
MONTAGEANLEITUNG DIGI SENS KL66 **112**
SCHEMA TINA TI **114**
SCHEMA KI-CAD **115**
PINBELEGUNG RASPBERRY PI PICO 2W **118**
DATENBLATT GEHÄUSE **120**
BAUTEILE PCB **121**
2D ANSICHT PCB LAGEN **122**
MASSSKIZZEN TESTAUFBAU **124**
CAD ZEICHNUNGEN **126**
STÜCKLISTE TESTAUFBAU **128**
MESSDATEN TESTPHASE 1 **129**
MESSDATEN TESTPHASE 2 **135**

MANAGEMENT SUMMARY

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Prototyp eines Auswertegeräts für den Lastmesssensor DIGI SENS KL66 entwickelt. Ziel der Arbeit war es, die Grundlage für den allfälligen zukünftigen Einsatz dieses Sensors zu schaffen. Der KL66 basiert auf der Schwingdraht-Technologie und liefert ein Frequenzsignal, aus welchem die Belastung ermittelt werden kann. Der Sensor zeichnet sich durch eine zuverlässige und präzise Messmethode aus und bietet damit das Potenzial, bestehende Lösungen zur Lastmessung zu ergänzen oder zu ersetzen.

Die Entwicklung umfasste die vollständige Konzeption und Realisierung der elektronischen Bedieneinheit. Für die Hardware wurde eine eigene Leiterplatte entwickelt, welche unter anderem die Spannungsversorgung, die Signalverarbeitung, ein Display, Bedientasten und Relaisausgänge beinhaltet.

Parallel zur Hardwareentwicklung wurde eine umfangreiche Software erstellt. Diese übernimmt die Frequenzmessung, die Berechnung der Kabinenlast sowie die Kalibrierung und Überwachung des Systems. Zusätzlich wurde ein Webinterface integriert, welches die Bedienung und Kalibrierung über eine drahtlose Verbindung ermöglicht.

Zur Überprüfung der entwickelten Auswerteeinheit wurden zwei Testphasen durchgeführt. In einer ersten Phase wurde ein eigens konstruierter Prüfaufbau eingesetzt, um das Verhalten des Sensors unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. In einer zweiten Phase erfolgten Messungen an einer realen Aufzugsanlage. Dabei konnten die Praxistauglichkeit, das Messverhalten unter realen Bedingungen sowie die Bedienbarkeit des Systems untersucht werden.

VORSTELLUNG

BERUFLICHER WERDEGANG

Daniel Renggli

Neumättilli, 6166 Hasle

Lehre als Elektroinstallateur EFZ Allemann Elektro AG 2010-2014

- Praxisorientierte Grundausbildung in einem Kleinbetrieb mit hoher Selbständigkeit

Elektroinstallateur EFZ Allemann Elektro AG 2014-2017

- Planung und Ausführung von Servicearbeiten
- Elektroplanung von EFH / MFH
- Management von Neubauten / Umbauten
- Installationen vorwiegend im Wohnungsbau und Landwirtschaft

Liftmonteur EMCH Aufzüge AG 2017-2023

- Montage Neu- und Ersatzanlagen
- Ausführung von Modernisierungen
- Montage div. Aufzugstypen (Kleingüteraufzug, Personenlifte, Warenlifte, Autolifte, Glaslifte)
- Montage div. Antriebstypen (seilmechanisch, seilmechanisch-hydraulisch, hydraulisch)

Chefmonteur EMCH Aufzüge AG seit 2023

- Vorbereiten der Montagearbeiten
- Führen von Montagepersonal
- Management und Controlling der Montagen
- Inbetriebnahme und Abnahme der Aufzüge
- Übergabe an Kunden

Weiterbildung dipl. Elektrotechniker HF 2023-2026

- Entwicklung elektrotechnischer Schaltungen
- Programmierung von Mikroprozessoren und speicherprogrammierbaren Steuerungen
- Leadership und Management

EMCH AUFZÜGE AG

Firmengeschichte

Die EMCH Aufzüge AG mit Hauptsitz in Bern blickt auf eine über 145-jährige Unternehmensgeschichte zurück. Gegründet wurde das Unternehmen im Jahr 1880 von Hans Emch ursprünglich als Mühlenbaubetrieb. Im Laufe der Industrialisierung entwickelte sich das Unternehmen kontinuierlich weiter und spezialisierte sich auf die Planung und Herstellung von Aufzugsanlagen. Dank ihrer Innovationskraft und dem hohen Qualitätsanspruch etablierte sich EMCH als einer der führenden unabhängigen Aufzugshersteller der Schweiz.

Bis heute befindet sich das Unternehmen in Familienbesitz und wird bereits in der vierten Generation geführt. Ein wichtiger Meilenstein war die Eröffnung der neuen Produktionsstätte 1968 in Bern, wo auch heute noch ein Grossteil der Aufzüge entwickelt und gefertigt wird. Rund 230 Mitarbeitende sind am Standort Bern beschäftigt und tragen zur Entwicklung, Produktion und Betreuung hochwertiger Aufzugsanlagen bei.

Als Aktiengesellschaft ist EMCH heute in der gesamten Schweiz tätig und realisiert darüber hinaus internationale Projekte. In den letzten Jahren hat das Unternehmen sein Tätigkeitsgebiet kontinuierlich erweitert und ist seit 2021 auch mit einer Niederlassung Paris in Frankreich vertreten. Mit der Übernahme der BIKO Verladetechnik 2023 und einem Minderheitsanteil der Lüthi Aufzüge AG anfangs 2026 wächst die Firma EMCH Aufzüge AG stetig. Zur Sicherstellung eines hohen Qualitätsstandards sowie eines verantwortungsvollen Umweltmanagements ist das Unternehmen nach ISO 9001 und ISO 14001 zertifiziert.

Tätigkeitsbereich

Als einer der grössten unabhängigen Aufzugshersteller der Schweiz produziert EMCH jährlich eine Vielzahl massgeschneiderter Aufzugsanlagen. Neben der Entwicklung und Herstellung neuer Anlagen gewinnt auch die Modernisierung und Reparatur bestehender Aufzüge zunehmend an Bedeutung. Das Unternehmen bietet sowohl Standardlösungen als auch individuell geplante Spezialanlagen an und begleitet seine Kunden über den gesamten Lebenszyklus eines Aufzugs, von der Beratung und Planung über die Montage bis hin zur Wartung, Modernisierung und Reparatur.

Zum Produktportfolio des Unternehmens gehören Personenaufzüge, Lastenaufzüge, Autoaufzüge, Panorama- und Designaufzüge sowie Hebebühnen, welche nach Wunsch individuell auf die Anforderungen der Kundschaft abgestimmt werden.

Besonderheiten

Die EMCH Aufzüge AG steht für Schweizer Qualität, Innovation und Individualität. Im Gegensatz zu vielen internationalen Grosskonzernen entwickelt und produziert das Unternehmen seine Aufzüge in der Schweiz. Dadurch können auch anspruchsvolle Sonderlösungen wirtschaftlich umgesetzt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Nachhaltigkeit. Bestehende Aufzugsanlagen werden, wenn möglich modernisiert, anstatt vollständig ersetzt. Dadurch werden Ressourcen geschont und gleichzeitig Sicherheit, Komfort und Energieeffizienz verbessert.

Dank ihrer langjährigen Erfahrung, der eigenen Produktion sowie eines schweizweiten Service- und Wartungsnetzes hat sich die EMCH Aufzüge AG als zuverlässiger Partner für private, gewerbliche und öffentliche Bauherren etabliert. Die Verbindung von traditionellem Familienunternehmen, modernster Technik und kundenorientierten Lösungen macht EMCH zu einem der bedeutendsten Aufzugsunternehmen der Schweiz.

Quelle: ChatGPT



1 EMCH DESIGN LIFT

Quelle: www.emch.com

LASTMESSUNG AN AUFZÜGEN

LASTMESSVERFAHREN

Zur Erfassung der Kabinenlast werden in Aufzugsanlagen überwiegend Dehnmessstreifen (DMS) oder Drucksensoren eingesetzt. Beide Messverfahren dienen dazu, die auf die Aufzugskabine wirkende Last zu bestimmen und der Steuerung zur Verfügung zu stellen. Die erfassten Messwerte werden unter anderem für die Überlastüberwachung, Komfort- und Sicherheitsfunktionen verwendet.

Bei der Lastmessung mit Dehnmessstreifen werden DMS auf tragenden Bauteilen des Aufzugs befestigt. Je nach Aufzugsbauart befinden sich diese beispielsweise an den Aufhängungen der Kabine, an Seilendpunkten oder an anderen mechanisch belasteten Konstruktionselementen. Die Dehnmessstreifen werden an ein Auswertegerät angeschlossen.

Wird die Aufzugskabine belastet, verformen sich die tragenden Bauteile geringfügig. Diese elastische Verformung führt zu einer Änderung des elektrischen Widerstands der Dehnmessstreifen. Das Auswertegerät misst die Widerstandsänderung, berechnet daraus die wirkende Kraft und ermittelt anschliessend die aktuelle Kabinenlast.

Beim Messverfahren mit Drucksensoren werden diese zwischen zwei mechanischen Bauteilen installiert, beispielsweise zwischen Kabinenrahmen und Kabine oder an den Auflagerpunkten der Kabine. Die Sensoren erfassen die auf sie wirkende Druckkraft und wandeln diese in ein elektrisches Signal um. Die Signale werden anschliessend von einem Auswertegerät verarbeitet.

Steigt die Last in der Aufzugskabine, erhöht sich die auf die Drucksensoren wirkende Kraft. Diese Kraft wird vom Sensor gemessen und proportional als elektrisches Signal ausgegeben. Das Auswertegerät berechnet daraus die aktuelle Kabinenlast und übermittelt den Messwert an die Aufzugssteuerung.

Beide Messverfahren erfüllen die Anforderungen der geltenden Normen hinsichtlich der Lastüberwachung. Aufgrund ihrer indirekten Messmethode weisen sie jedoch eine begrenzte Messgenauigkeit auf. Darüber hinaus befinden sich die Auswertegeräte häufig auf dem Kabinendach oder unter der Kabine, wodurch Kalibrierungen und Wartungsarbeiten erschwert werden.

Für Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an die Messgenauigkeit, beispielsweise zur sicheren Erkennung geringer Lasten oder zur Umsetzung erweiterter Steuerungsfunktionen, stossen diese Verfahren an ihre Grenzen.

Quelle: ChatGPT

RISIKEN UND NACHTEILE OHNE LASTMESSUNG

Die Lastmessung ist ein wesentlicher Bestandteil moderner Aufzugsanlagen. Sie überwacht kontinuierlich die Beladung der Kabine und ermöglicht dadurch sowohl sicherheitsrelevante als auch betriebliche Funktionen. Fehlt eine Lastmesseinrichtung oder liefert diese fehlerhafte Messwerte, können verschiedene Risiken für den Betrieb der Anlage entstehen.

So besteht beispielsweise die Gefahr, dass der Aufzug trotz Überschreitung der zulässigen Nennlast in Betrieb genommen wird. Eine solche Überlastung kann zu einer erhöhten Beanspruchung der Tragmittel, wie Seile oder Gurte, sowie der Antriebs- und Bremseinheit führen. Dadurch steigt der Verschleiss mechanischer Komponenten, was langfristig zu einer Verkürzung der Lebensdauer der gesamten Aufzugsanlage führen kann.

Darüber hinaus kann sich eine nicht korrekt erfasste Beladung negativ auf das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten des Aufzugs auswirken. Dies kann wiederum die Wahrscheinlichkeit von Störungen oder Sicherheitsabschaltungen erhöhen. Bei Seilaufzügen kann eine übermässige Belastung zudem dazu führen, dass die Traktion zwischen den Seilen und der Treibscheibe beeinträchtigt wird und im ungünstigen Fall ein Rutschen der Seile auf der Treibscheibe auftritt.

Viele moderne Aufzugssteuerungen nutzen die erfassten Lastinformationen nicht nur zur Gewährleistung der Sicherheit, sondern auch zur Optimierung des Anlagenbetriebs. Ohne eine zuverlässige Lastmessung können verschiedene Funktionen nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden.

Die Lastinformationen dienen für energieoptimierte Fahrstrategien sowie zur Erkennung einer leeren Kabine. Funktionen wie die Logensteuerung sind auf eine zuverlässige Erfassung der Kabinenbelastung angewiesen. Bei Aufzugsanlagen mit mehreren Kabinen können die Lastinformationen zudem in die Gruppensteuerung einfliessen und dazu beitragen, die Verteilung und Koordination der einzelnen Aufzüge zu optimieren.

Quelle: ChatGPT

PROJEKTINITIALISIERUNG

PROJEKTEINGABE

Thema

Aktuelle Lastmesssysteme für Aufzugskabinen basieren meist auf klassischen Dehnmessstreifen (DMS). Diese Technologie stösst in der Praxis häufig an Grenzen bezüglich der Messgenauigkeit. Besonders die zuverlässige Erkennung von Kleinstlasten, beispielsweise ob sich eine einzelne Person in der Kabine befindet oder ob diese komplett leer ist, ist im Alltag fehleranfällig.

Um diese Problematik zu lösen, soll der präzise Dehnungsaufnehmer DIGI SENS KL66 eingesetzt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen nutzt dieser eine patentierte Schwingdraht-Technologie, die Deformationen im Bruchteil eines Mikrometers erfasst, eine hervorragende Langzeitstabilität aufweist und ein frequenzbasiertes 5V TTL-Ausgangssignal liefert.

Da es für diesen Sensor herstellerseitig kein fertiges, marktreifes Einstell- und Auswertegerät für den spezifischen Einsatz im Aufzugsbau gibt, soll dieses System im Rahmen dieser Diplomarbeit realisiert werden.

Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Evaluation einer geeigneten Hardware-Plattform sowie die vollständige Softwareentwicklung für ein funktionsfähiges Auswertegerät. Das System muss das TTL-Signal des DIGI SENS KL66 Sensors einlesen, verarbeiten und die definierten Beladungszustände bei Schwellenüberschreitung über potenzialfreie Kontakte direkt an die Aufzugssteuerung der EMCH Aufzüge AG übermitteln.

Kunde

EMCH Aufzüge AG. Die Entwicklung erfolgt spezifisch für die Anforderungen und Schnittstellen der dort eingesetzten Aufzugssteuerungen.

Sinn und Zweck

Das System dient der Erhöhung der Messgenauigkeit bei der Kabinenlastbestimmung für die EMCH Aufzüge AG. Durch die exakte Erkennung der Leerlasten können neue Funktionen, wie beispielsweise Penthouse -oder Logensteuerungen einfacher realisiert werden. Zudem wird der Installations- und Inbetriebnahmeprozess durch ein einfaches Kalibrierungsverfahren optimiert.

Endergebnis

Bei Abschluss der Arbeit (nach ca. 200-250 Stunden Aufwand) liegt ein voll funktionsfähiger Prototyp vor. Das Ergebnis umfasst konkret:

Hardware-Evaluation & Prototypenaufbau: Eine fundierte Evaluation und Auswahl einer geeigneten Prozessor- und Steuerungsplattform, welche die messtechnischen Anforderungen abdeckt. Der Prototyp wird um eine Relaisstufe für die Steuerungsschnittstelle sowie die gewählte HMI-Hardware erweitert.

Konzeption und Entwicklung des HMI: Evaluation und Realisierung einer optimalen Schnittstelle für die Montage und Servicemitarbeiter. Untersucht und bewertet werden Konzepte wie ein physisches Display mit Tasten am Gerät, ein lokales Webinterface via WLAN-Access-Point oder eine Bluetooth-App-Anbindung, um die für EMCH beste Lösung umzusetzen.

Software / Firmware

Algorithmus zur genauen Frequenzmessung des Schwingdraht-Sensors.

Implementierung einer Teillast-Kalibrierung: Das Einlernen erfolgt über bekannte Gewichte unterhalb der Volllast. Das Gerät interpoliert anschliessend die Werte mathematisch bis zur Überlastgrenze selbstständig auf.

Menügeführte Konfiguration zur freien Definition der Lastschwellen (Leer, Voll, Überlast sowie ein weiterer, frei wählbarer Lastmesspunkt).

Diagnose-Modus: Anzeige der aktuellen Last in Kilogramm sowie von Sensor-Detailinformationen (Rohfrequenz in Hz etc.).

Schnittstelle zur Steuerung: Schaltung von integrierten potenzialfreien Kontakten (Relais), sobald die jeweils eingestellten Lastgrenzen überschritten werden, um ein direkt verarbeitbares Signal an die Aufzugssteuerung zu senden.

Erfolgskriterien

Zuverlässige Zustandserkennung: Das System unterscheidet den Zustand "Kabine leer" und die Anwesenheit einer erwachsenen Person absolut fehlerfrei und reproduzierbar.

Interpolationspräzision: Die mathematische Hochrechnung von der eingelernten Teillast auf die reale Voll- und Überlast weicht maximal um die Vorgaben gemäss der Norm EN81-20:2020 ab.

Schnittstellenfunktion: Die potenzialfreien Kontakte schalten bei Überschreitung der Schwellenwerte (Leer-, Voll-, Überlast) absolut verzögerungs- und prellfrei.

Bedienbarkeit: Die Kalibrierung und das Abrufen der Diagnosedaten lassen sich über physische Tasten und Display oder Webinterface intuitiv durchführen.

Projektlandung: Das Projekt wird innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens von ca. 200-250 Arbeitsstunden erfolgreich abgeschlossen und dokumentiert.

Kosten: Die Hardwarekosten sollen einen Betrag von CHF 1500 nicht überschreiten.

LASTENHEFT

AUSGANGSLAGE

Nach den heute geltenden Vorschriften muss jede Aufzugsanlage, unabhängig von ihrer Grösse oder ihrem Einsatzbereich, mit einer Lastmesseinrichtung ausgestattet sein. In der Praxis wird dies häufig mithilfe von Dehnmessstreifen oder Drucksensoren umgesetzt. Die Genauigkeit dieser Systeme ist jedoch begrenzt. Sie erfüllen zwar die gesetzlichen Anforderungen, bieten jedoch nur die notwendige Mindestfunktionalität.

PROBLEMSTELLUNG

Die Auswertegeräte werden in der Regel auf oder unter der Liftkabine montiert. Dies hat zur Folge, dass für Kalibrierungen oder Anpassungen das Kabinendach oder die Liftgrube oft betreten werden muss. Zudem kann die aktuell gemessene Last häufig nur direkt am Auswertegerät abgelesen werden. Aufgrund der begrenzten Messgenauigkeit lassen sich weiterführende Funktionen wie beispielsweise eine Logensteuerung oder die Ruffreigabe bei leerer Kabine nur eingeschränkt oder gar nicht zuverlässig realisieren. Während die Anwesenheit einer erwachsenen Person in der Regel erkannt wird, kann das Gewicht eines Kindes unter Umständen nicht eindeutig erfasst werden.

ZIEL DES PROJEKTS

Aus diesem Grund soll ein Lastmessverfahren entwickelt bzw. eingesetzt werden, dass eine hohe Messgenauigkeit sowie Langzeitstabilität bietet und gleichzeitig eine einfache, unkomplizierte Kalibrierung ermöglicht. Durch die vereinfachte Inbetriebnahme kann der Installations- und Zeitaufwand reduziert werden, da weniger Eingriffe an der Liftkabine oder in der Liftgrube erforderlich sind. Dies erhöht nicht nur die Effizienz bei der Installation und Wartung, sondern verbessert auch die Zuverlässigkeit der Lastmessung und erweitert die Möglichkeiten moderner Aufzugssteuerungen.

SOLLZIELE

Die folgenden Anforderungen sind für die erfolgreiche Umsetzung des Prototyps zwingend zu erfüllen.

S01 – Hardwareprototyp

Es ist ein funktionsfähiger Hardwareprototyp zu entwickeln, welcher sämtliche für die Messwerterfassung und Auswertung erforderlichen Komponenten beinhaltet.

Der Prototyp muss eine geeignete Mikroprozessoreinheit enthalten.

S02 – Anschluss DIGI SENS KL66

Der DIGI SENS KL66 muss elektrisch an das Auswertegerät angeschlossen werden können.

S03 – Signalerfassung

Die Software muss das Sensorsignal des DIGI SENS KL66 zuverlässig erfassen und auswerten können.

S04 – Lastberechnung

Aus dem erfassten Sensorsignal muss ein Lastwert in kg berechnet werden können.

S05 – Kalibrierung

Das System muss eine Kalibrierung des Messwertes ermöglichen.

Die Kalibrierung muss reproduzierbar durchführbar sein.

S06 – Erkennung von Kleinstlasten

Das System muss eine ausreichend hohe Messauflösung und Messgenauigkeit aufweisen, um geringe Laständerungen innerhalb des definierten Messbereichs erkennen zu können.

S07 – Anzeige

Der aktuelle Messwert bzw. Lastwert muss auf einem Display dargestellt werden können.

Zusätzlich sollen relevante Betriebs- und Diagnoseinformationen angezeigt werden.

S08 – Physische Bedienung

Die Bedienung des Auswertegeräts muss über physische Bedienelemente und das Display möglich sein.

Mindestens folgende Funktionen müssen darüber erreichbar sein:

- Navigation durch das Menü
- Anzeige des aktuellen Lastwertes
- Durchführung der Kalibrierung
- Einstellung der relevanten Parameter
- Anzeige von Diagnoseinformationen

S09 – Lastschwellwerte

Es müssen vier frei definierbare Lastschwellwerte eingestellt werden können.

Die Schwellwerte sollen abhängig vom vorgesehenen Anwendungsfall parametriert werden können.

S10 – Relaisausgänge

Die definierten Lastschwellwerte müssen über potenzialfreie Relaiskontakte ausgegeben werden können.

Das Schaltverhalten der Relais muss eindeutig definiert und reproduzierbar sein.

S11 – Diagnose

Das Gerät muss relevante Informationen zum Zustand des Sensors und der Messwerterfassung anzeigen können.

S12 – Speicherung

Die für den Betrieb erforderlichen Kalibrier- und Einstellwerte müssen dauerhaft gespeichert werden können, sodass diese nach einem Neustart des Systems wieder zur Verfügung stehen.

S13 – Versorgungsspannung

Das Auswertegerät soll für den Betrieb an einer Gleichspannungsversorgung 24V DC ausgelegt werden.

S14 – Gehäuse

Der Prototyp soll in einem geeigneten Gehäuse vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.

S15 – Abgabetermin

Das Projekt soll bis zum 09.11.2026 realisiert sein.

S16 – Finanzierung

Das vorgegebene Budget von CHF 1500 soll eingehalten werden

WUNSCHZIELE

Die folgenden Anforderungen sollen nach Möglichkeit umgesetzt werden und stellen eine Erweiterung der grundlegenden Funktionalität dar.

W01 – Webinterface

Das Auswertegerät soll über ein Webinterface bedient und parametriert werden können.

Das Webinterface soll insbesondere ermöglichen:

- Anzeige des aktuellen Lastwertes
- Anzeige von Sensorinformationen
- Durchführung bzw. Unterstützung der Kalibrierung
- Einstellung von Lastschwellwerten
- Anzeige von Diagnoseinformationen

W02 – Angepasstes Gehäuse

Für den Prototyp soll ein an die Hardware angepasstes Gehäuse (3D Druck) entwickelt werden.

W03 – Mehrere Sensoren

Die Hardware soll für den möglichen Anschluss mehrerer DIGI SENS KL66 Sensoren vorbereitet werden.

W04 – Referenzsystem

Die Messgenauigkeit des entwickelten Systems soll mit einem geeigneten Referenzsystem überprüft werden.

ABGRENZUNG DES PROJEKTS

Das Projekt umfasst die Entwicklung und Erprobung eines funktionsfähigen Prototyps zur Auswertung des DIGI SENS KL66.

Nicht Bestandteil des Projekts sind:

- Serienentwicklung
- vollständige industrielle Produktfreigabe
- Zertifizierung eines Serienprodukts
- vollständige sicherheitsgerichtete Zulassung
- abschliessende Integration in sämtliche am Markt verfügbaren Aufzugssteuerungen

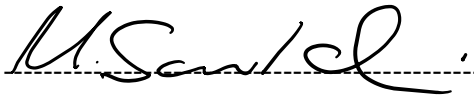
Eine spätere Serienentwicklung kann auf den Ergebnissen des entwickelten Prototyps aufbauen.

FREIGABE LASTENHEFT

Das vorliegende Lastenheft bildet die verbindliche Grundlage für die weitere Entwicklung des Projekts.

Mit der Freigabe werden die beschriebenen Anforderungen und der definierte Projektumfang als Grundlage für die Erstellung des Pflichtenhefts und die anschließende Entwicklung des Prototyps bestätigt.

Auftraggeber / Kunde

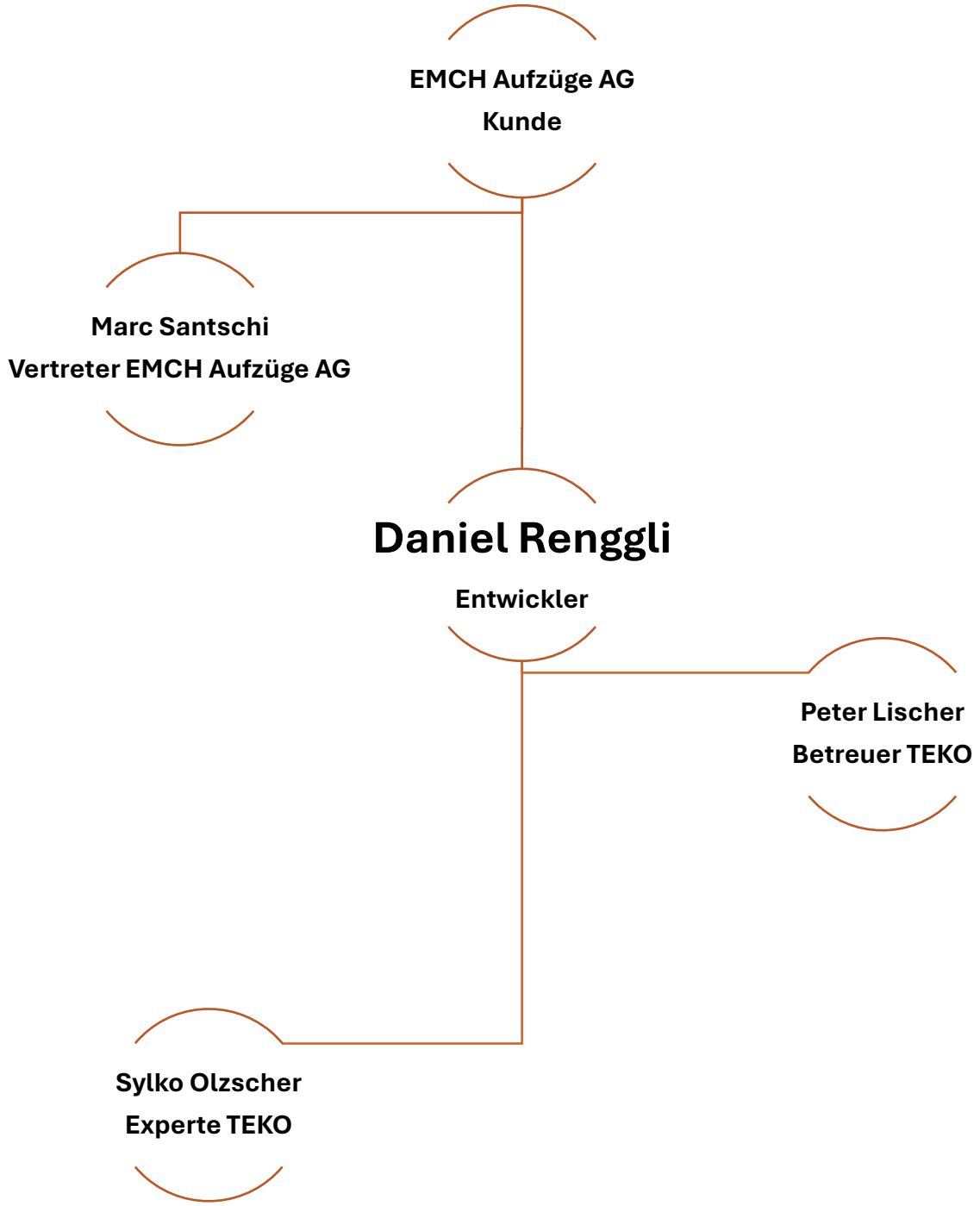
Unterschrift	Ort / Datum
	Bern, 17.08.2026
Marc Santschi, EMCH Aufzüge AG	

Entwickler

Unterschrift	Ort / Datum
	Bern, 17.08.2026
Daniel Renggli, EMCH Aufzüge AG	

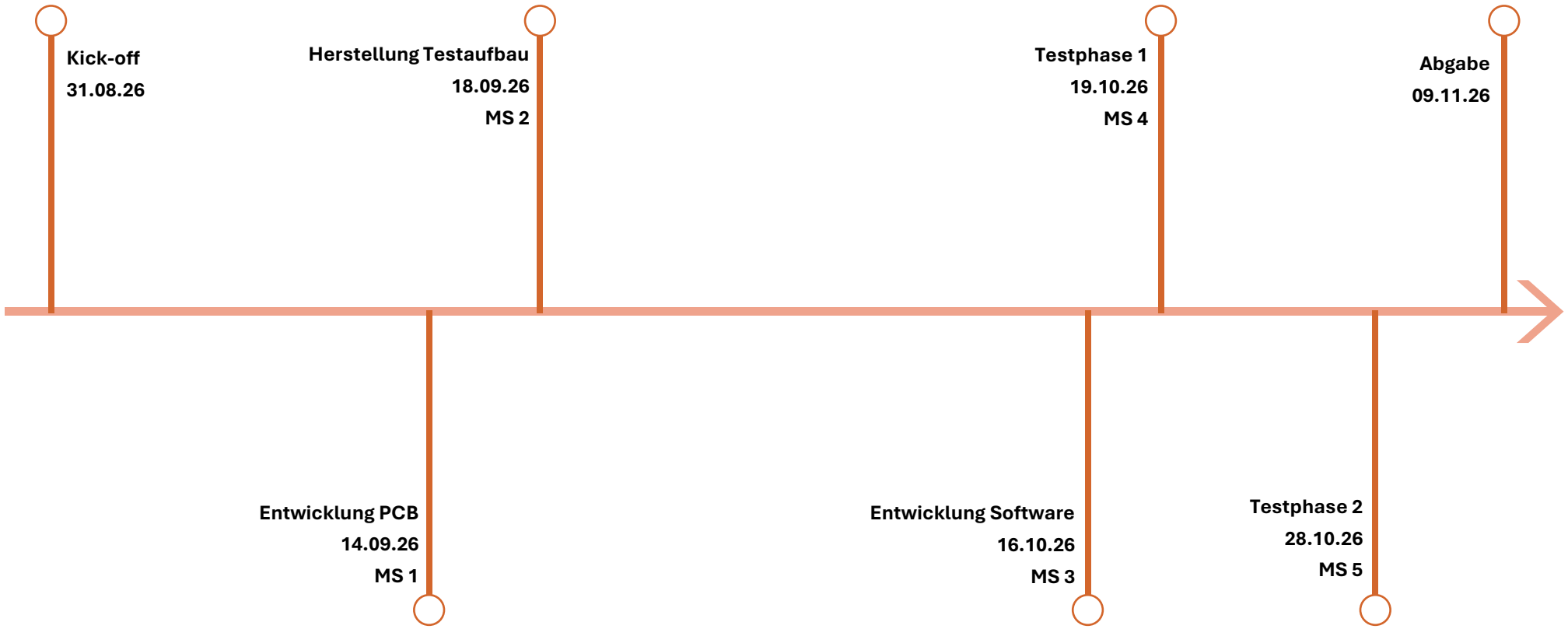
PFLICHTENHEFT

PROJEKTORGANISATION



2 Projektorganisation

PROJEKTSTRUKTURPLAN



3 Projektstrukturplan

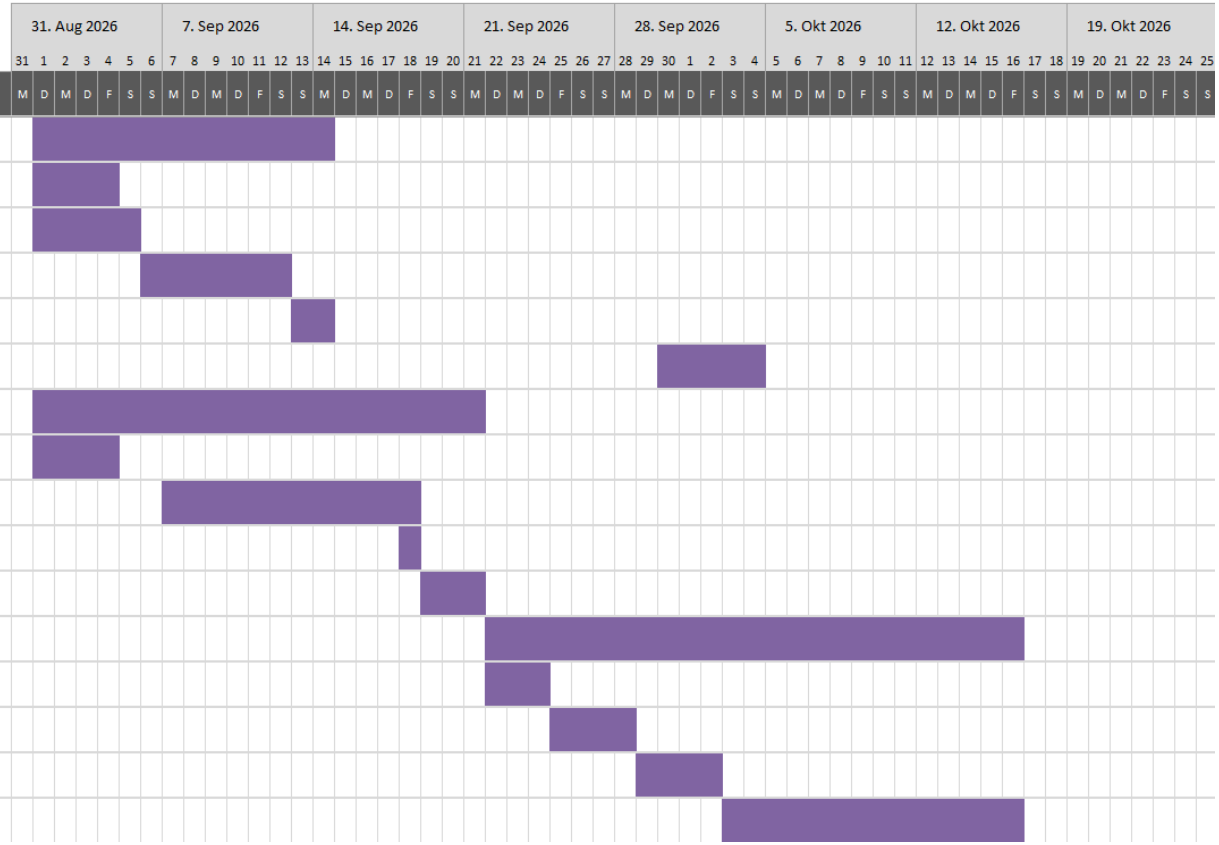
GANNT DIAGRAMM

Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 1

AUFGABE	FORTSCHRITT	START	ENDE
MS 1 Entwicklung PCB		1.9.26	14.9.26
Schema PCB zeichnen		1.9.26	4.9.26
Evaluation Mikroprozessor / Display / Taster etc.		1.9.26	5.9.26
Layout PCB erstellen		6.9.26	12.9.26
Überprüfung und Bestellung		13.9.26	14.9.26
geplantes Lieferdatum PCB		30.9.26	4.10.26
MS 2 Herstellung Testaufbau		1.9.26	21.9.26
Besprechung Testaufbau mit Konstruktion EMCH		1.9.26	4.9.26
Herstellung Testaufbau EMCH		7.9.26	18.9.26
geplantes Lieferdatum Testaufbau		18.9.26	18.9.26
Installation Testaufbau		19.9.26	21.9.26
MS 3 Entwicklung Software		22.9.26	16.10.26
Einlesen Sensorsignal		22.9.26	24.9.26
Ansteuerung Display		25.9.26	28.9.26
Umrechnung in kg Werte		29.9.26	2.10.26
Kalibrierungsroutine		3.10.26	16.10.26

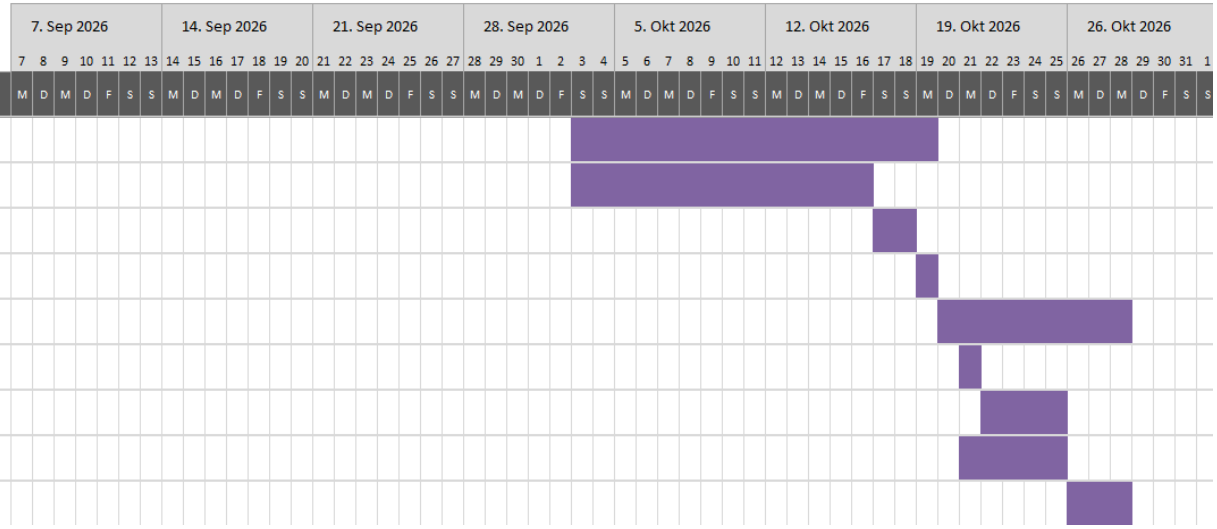


Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 2

AUFGABE	FORTSCHRITT	START	ENDE
MS 4 Testphase 1		3.10.26	19.10.26
Nullpunktableichungen / Referenzkalibrierungen		3.10.26	16.10.26
Vergleich Referenzsystem / Genauigkeit		17.10.26	18.10.26
Auswertung und Dokumentation		19.10.26	19.10.26
MS 5 Testphase 2		20.10.26	28.10.26
Installation Prototyp an Testanlage		21.10.26	21.10.26
Nullpunktableichungen / Referenzkalibrierungen		22.10.26	25.10.26
Praxistauglichkeit		21.10.26	25.10.26
Auswertung und Dokumentation		26.10.26	28.10.26



4 GANNT Diagramm

FINANZIERUNG

Die Budgetplanung der Erstellung eines Hardwareprototypen als Auswertegerät für den DIGI SENS KL66 Lastmesssensor stellt sich wie folgt zusammen. Der Kostenrahmen wurde bei der Projekteingabe definiert.

Pos.	Kostenposition	Beschreibung	Menge	Einzelpreis CHF	Budget CHF
1	Hardware	Sensor KL66	1	108.00	108.00
2	Hardware	Mikrocontroller / Display	1	120.00	120.00
3	Hardware	PCB	1	250.00	250.00
4	Hardware	Gehäuse	1	80.00	80.00
5	Hardware	Testaufbau	1	250.00	250.00
6	Software	Lizenzgebühren	1	50.00	50.00
7	Messgerät	Oszilloskop Multimeter	1	95.00	95.00
8	Messgerät	Seilwaage	2	63.00	126.00
9	Messgerät	Drehmomentschraubendreher	1	90.00	90.00
		Total			**1169.00**
		Budgetvorgabe			**1500.00**
		Reserve			331.00

1 Tabelle Finanzierung

Die Budgetvorgabe ist ausreichend bemessen. Gemäss aktueller Planung werden rund 78 % des vorgesehenen Budgets benötigt, wodurch eine Reserve von 22 % verbleibt. Diese Reserve bietet einen ausreichenden finanziellen Puffer für unvorhergesehene Aufwendungen. Eine Budgetüberschreitung ist nach aktuellem Planungsstand nicht zu erwarten.

SWOT-ANALYSE

Die SWOT-Analyse ist ein strategisches Analyseinstrument zur systematischen Bewertung einer Ausgangssituation. Sie dient dazu, interne Stärken und Schwächen sowie externe Chancen und Risiken zu identifizieren und daraus geeignete Strategien abzuleiten. Die Methode unterstützt Unternehmen und Projekte dabei, fundierte Entscheidungen zu treffen und die Erfolgsaussichten eines Vorhabens zu verbessern.

Bestandteile der SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse setzt sich aus vier Elementen zusammen:

Strengths (Stärken): Interne Faktoren, die einen Vorteil gegenüber anderen Lösungen oder Wettbewerbern darstellen. Dazu gehören beispielsweise technisches Know-how, hohe Produktqualität oder innovative Technologien.

Weaknesses (Schwächen): Interne Faktoren, die den Erfolg eines Projekts oder Unternehmens beeinträchtigen können, wie fehlende Ressourcen, hohe Kosten oder begrenzte Erfahrung.

Opportunities (Chancen): Externe Einflüsse, die positive Entwicklungsmöglichkeiten bieten. Beispiele sind neue Marktanforderungen, technologische Entwicklungen oder gesetzliche Änderungen.

Threats (Risiken): Externe Faktoren, die den Projekterfolg gefährden können, beispielsweise zunehmender Wettbewerb, wirtschaftliche Unsicherheiten oder neue gesetzliche Vorgaben.

Nutzen und Anwendung

Die SWOT-Analyse wird häufig in der strategischen Unternehmensplanung sowie im Projektmanagement eingesetzt. Sie ermöglicht eine strukturierte Beurteilung der aktuellen Situation und unterstützt die Entwicklung geeigneter Massnahmen. Durch die Gegenüberstellung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken können Potenziale gezielt genutzt, Schwachstellen reduziert und Risiken frühzeitig erkannt werden.

Quelle: ChatGPT



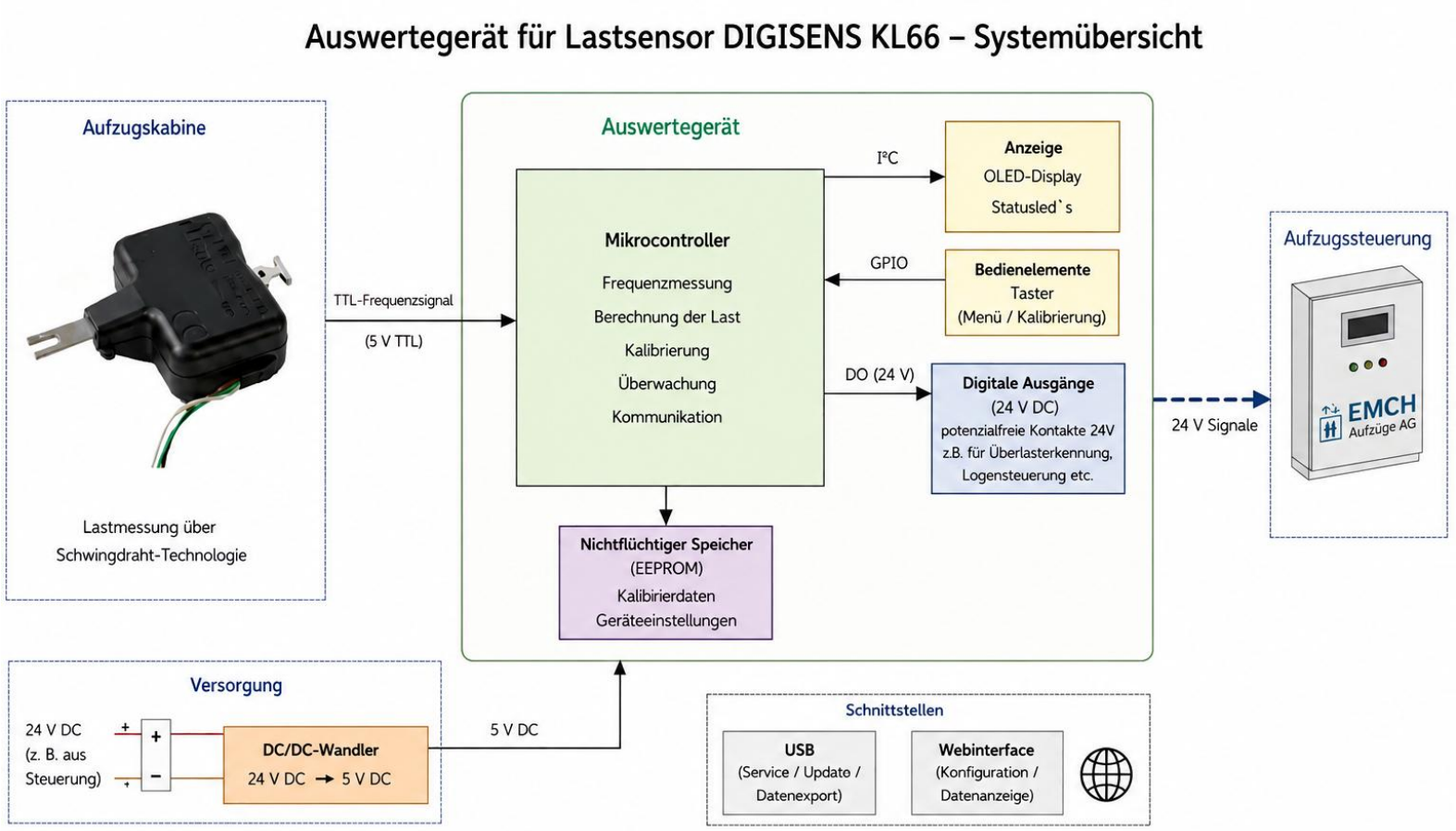
Quelle: ChatGPT

5 Matrix SWOT Analyse

Nr.	Risiko	Beschreibung	Massnahme
1	mittel	Zeitplanung kann nicht eingehalten werden	realistische Zeitplanung Priorisierung der kritischen Arbeiten stetiges Controlling
2	mittel	Software nicht lauffähig	wenn nötig externe Hilfe beiziehen
3	mittel	falsche Wahl der Komponenten	fundierte Wahl der Komponenten
4	gering	Budget kann nicht eingehalten werden	gute Budgetierung mit Reserve
5	gering	Hardware nicht lauffähig aufgrund Layoutfehler	gründliche und mehrfache Kontrollen
6	mittel	Hardware wird verspätet, defekt oder gar nicht geliefert	Priorisierung der Hardwarebestellung
7	gering	Abnahmetest können nicht durchgeführt werden	Testaufbau wird erstellt In-House Testanlage vorhanden
8	gering	Testaufbau nicht termingerecht oder falsch hergestellt	exakte Konzeption erstellen Termine definieren

2 Tabelle SWOT Analyse

SYSTEMÜBERSICHT



6 Systemübersicht

Quelle: ChatGPT

FUNKTIONSBESCHREIBUNG

Elektrischer Aufbau und Funktionsweise

Die Versorgung des Auswertegeräts erfolgt mit einer Gleichspannung von 24V DC, welche direkt aus der Aufzugssteuerung beziehungsweise der vorhandenen Kabinenelektronik bezogen werden kann. Die Eingangsspannung wird auf der Leiterplatte über einen integrierten DC/DC-Wandler auf 5V DC reduziert. Die erzeugte 5V-Versorgung dient der stabilen und definierten Spannungsversorgung des Mikrocontrollers sowie der angeschlossenen Sensorik und weiterer elektronischer Komponenten.

Der Lastmesssensor DIGI SENS KL66 liefert in Abhängigkeit von der auf den Sensor wirkenden Last ein kontinuierliches 5V-TTL-Frequenzsignal. Die Frequenz des Ausgangssignals steht dabei in direktem Zusammenhang mit der gemessenen Last und wird zur Bestimmung des aktuellen Lastwertes verwendet.

Der Mikrocontroller bildet die zentrale Verarbeitungseinheit des Auswertegeräts. Er übernimmt die Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der Sensorsignale sowie die Steuerung und Überwachung der angeschlossenen Komponenten. Zu seinen wesentlichen Aufgaben gehören:

Frequenzmessung: Erfassung und präzise Auswertung des vom DIGI SENS KL66 bereitgestellten Frequenzsignals.

Lastberechnung: Umrechnung der erfassten Frequenz in einen entsprechenden Last- beziehungsweise Gewichtswert.

Kalibrierung: Durchführung des Kalibriervorgangs sowie Ermittlung und Speicherung des Nullpunkts und weiterer relevanter Kalibrierparameter.

Systemüberwachung: Kontinuierliche Überwachung der Messwerte, Betriebszustände und relevanten Systemparameter.

Ausgangssteuerung: Ansteuerung der digitalen Ausgänge beziehungsweise der nachgeschalteten Relais entsprechend den parametrierten Schwellwerten.

Bedien- und Kommunikationsfunktionen: Verarbeitung der Eingaben über die Bedienelemente sowie Kommunikation mit angeschlossenen Schnittstellen.

Für die dauerhafte Speicherung der Kalibrierparameter und gerätespezifischen Einstellungen wird ein nichtflüchtiger Speicher (EEPROM) eingesetzt. Die gespeicherten Daten bleiben auch bei einer Unterbrechung beziehungsweise einem vollständigen Ausfall der Versorgungsspannung erhalten. Dadurch ist gewährleistet, dass die ermittelten Kalibrierwerte nach einem Neustart des Auswertegeräts weiterhin zur Verfügung stehen.

Anzeige und Bedienung

Zur lokalen Anzeige von Messwerten, Betriebszuständen und Menüstrukturen ist ein OLED-Display vorgesehen. Die Kommunikation zwischen dem Display und dem Mikrocontroller erfolgt über eine I^2C-Schnittstelle. Dadurch können Messwerte und Systeminformationen übersichtlich dargestellt und die verschiedenen Betriebs- und Einstellmenüs visualisiert werden.

Die Bedienung des Auswertegeräts erfolgt über mehrere Taster, welche direkt über GPIO-Schnittstellen (General Purpose Input/Output) mit dem Mikrocontroller verbunden sind. Über die Bedienelemente können unter anderem Menüpunkte ausgewählt, Einstellungen vorgenommen und Kalibrierfunktionen ausgeführt werden.

Digitale Ausgänge und Relais

Die digitalen Ausgänge des Mikrocontrollers dienen zur Ansteuerung der auf der Leiterplatte angeordneten Relais. Über deren potenzialfreie Kontakte können definierte Schaltsignale an die übergeordnete Aufzugssteuerung übertragen werden. Dadurch können beispielsweise Zustände wie Überlast oder Volllast an die Aufzugssteuerung weitergegeben werden.

Die für die jeweiligen Schaltfunktionen erforderlichen Schwellwerte werden softwareseitig parametriert und können projektspezifisch an die jeweilige Aufzugsanlage angepasst werden. Die galvanisch beziehungsweise potenzialfrei ausgeführten Relaiskontakte ermöglichen dabei eine elektrische Trennung zwischen der Auswerteelektronik und den angeschlossenen Signalkreisen der Aufzugssteuerung.

Der Betriebszustand des Auswertegeräts sowie die Schaltzustände der Relais werden über Status-LEDs visualisiert. Dadurch können die Versorgungsspannung, der Betriebszustand sowie die Aktivierung der einzelnen Ausgänge ohne zusätzliche Messmittel unmittelbar erkannt werden.

Wartung und Kommunikation

Für Wartungs-, Service- und Entwicklungsarbeiten verfügt das Auswertegerät über eine USB-Schnittstelle. Diese ermöglicht insbesondere die Durchführung von Software- beziehungsweise Firmware-Updates sowie die Anpassung und Auslesung relevanter Parameter.

Zusätzlich wird eine drahtlose Kommunikationsmöglichkeit über ein Webinterface vorgesehen. Dadurch kann auf die Konfigurations- und Kalibrierfunktionen des Auswertegeräts über ein Smartphone, Tablet oder einen PC zugegriffen werden. Dies ermöglicht insbesondere eine komfortable Durchführung von Parametrierung- und Kalibrierarbeiten, ohne dass für diese Tätigkeiten eine direkte Verbindung mit der Leiterplatte erforderlich ist.

Um einen unbefugten Zugriff auf das Webinterface zu verhindern, wird die WLAN-Schnittstelle nicht dauerhaft aktiviert. Die Freigabe des Webinterfaces erfolgt manuell über einen dafür vorgesehenen Taster auf der Leiterplatte. Nach Betätigung des Tasters wird die drahtlose Schnittstelle für eine softwareseitig definierbare Zeitdauer freigeschaltet. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Zugang automatisch deaktiviert. Dadurch wird verhindert, dass das Webinterface dauerhaft erreichbar ist.

Der Zugriff auf das Webinterface wird zusätzlich durch eine Passwortauthentifizierung geschützt. Nur Personen mit den entsprechenden Zugangsdaten erhalten Zugriff auf die Konfigurations-, Kalibrier- und Wartungsfunktionen. Durch die Kombination aus manueller Freigabe, zeitlich begrenzter Aktivierung und Passwortschutz soll sichergestellt werden, dass Änderungen an den Geräteparametern nicht durch unbefugte Personen vorgenommen werden können.

Leiterplatte und mechanischer Aufbau

Die zentralen elektronischen Komponenten des Auswertegeräts, insbesondere Mikrocontroller, Display, Bedienelemente, Status-LEDs, Schnittstellen und Relais, werden auf einem projektspezifisch entwickelten Printed Circuit Board (PCB) zusammengeführt. Die Leiterplatte wird speziell für den Prototypen entwickelt und bildet die elektrische und mechanische Basis des Auswertegeräts.

Durch die Integration der einzelnen Komponenten auf einer gemeinsamen Leiterplatte sollen eine kompakte Bauweise, eine übersichtliche Verdrahtung sowie eine hohe Reproduzierbarkeit des Prototypenaufbaus erreicht werden.

Gehäuse

Zum Schutz der elektronischen Komponenten vor mechanischen Einwirkungen, Verschmutzung und unbeabsichtigtem Kontakt wird der Prototyp in einem geeigneten Kunststoffgehäuse untergebracht. Das Gehäuse wird entsprechend den Abmessungen und Anforderungen der entwickelten Leiterplatte ausgelegt.

Damit soll ein kompakter und transportabler Prototyp entstehen, der sowohl für die Erprobung im Testaufbau als auch für die anschliessende Installation an einer realen Aufzugsanlage geeignet ist.

KONZEPTVISUALISIERUNG AUSWERTEGERÄT



7 Konzeptvisualisierung Auswertegerät

Quelle: ChatGPT

TESTKONZEPT

Testverfahren und Erprobung des Auswertegeräts

Das Testverfahren zur Erprobung und Validierung des entwickelten Auswertegeräts in Verbindung mit dem DIGI SENS KL66 wird in zwei aufeinander aufbauende Phasen gegliedert. Durch die Unterteilung soll zunächst eine kontrollierte und reproduzierbare Prüfung des Prototyps unter Laborbedingungen ermöglicht werden. Anschliessend erfolgt die Erprobung unter praxisnahen Bedingungen an einer realen Aufzugsanlage.

Phase 1 – Erprobung des Prototyps mit einem mobilen Testaufbau

In der ersten Phase wird der entwickelte Prototyp mithilfe eines speziell dafür vorgesehenen Testaufbaus untersucht. Der Testaufbau ist für einen Belastungsbereich von 0 bis 100 kg ausgelegt und soll möglichst kompakt, handlich und transportabel ausgeführt werden. Dadurch kann der Prototyp unabhängig von einer bestehenden Aufzugsanlage getestet und verschiedene Testsituationen unter definierten Bedingungen reproduziert werden.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Phase ist die Erprobung des Kalibrierungsverfahrens. Dabei soll untersucht werden, wie sich unterschiedliche Nullpunkte beziehungsweise Ausgangswerte des Sensors auf die anschliessende Messung auswirken. Durch das gezielte Verändern der Ausgangsbedingungen können verschiedene Kalibriersituationen simuliert und die Funktion sowie Reproduzierbarkeit des entwickelten Kalibrierungsverfahrens überprüft werden.

Der Testaufbau ermöglicht zudem die definierte Aufbringung unterschiedlicher Prüflasten. Dadurch können Messwerte des Auswertegeräts bei verschiedenen Belastungszuständen erfasst und miteinander verglichen werden. Insbesondere die Messgenauigkeit bei kleinen Lasten kann auf diese Weise detailliert untersucht werden. Dies ist relevant, da geringe Laständerungen im Verhältnis zum Messbereich des Sensors einen erhöhten Einfluss auf die relative Messabweichung haben können.

Ein weiterer Bestandteil der ersten Testphase ist der vergleichende Genauigkeitsnachweis zwischen dem entwickelten Auswertegerät und einem bestehenden Messsystem. Als Grundlage für die Vergleichsmessungen wird die tatsächliche Prüflast mithilfe einer Seilwaage bestimmt. Vor Beginn der Versuchsreihe wird die Seilwaage mit einem Gewicht bekannter Masse überprüft, um die korrekte Erfassung der aufgebrachten Last sicherzustellen.

Anschliessend werden definierte Lastzustände erzeugt und die entsprechenden Messwerte des entwickelten Auswertegeräts sowie des Vergleichsmesssystems erfasst. Die durch die Seilwaage bestimmte Last dient dabei als Referenzwert für die Beurteilung der Messabweichungen. Durch die Durchführung mehrerer Messungen bei unterschiedlichen Belastungszuständen können die Messwerte der beiden Systeme systematisch miteinander verglichen werden.

Ziel dieser Untersuchung ist es, festzustellen, welches der beiden Messsysteme die höhere Messgenauigkeit im untersuchten Belastungsbereich aufweist. Hierzu werden insbesondere die Abweichungen zwischen dem jeweiligen Messwert und der durch die Seilwaage bestimmten Referenzlast sowie die Wiederholbarkeit der Messungen betrachtet. Die Ergebnisse ermöglichen eine objektive Beurteilung der Genauigkeit des entwickelten Auswertegeräts und liefern gleichzeitig Erkenntnisse für die weitere Optimierung des Kalibrierverfahrens.

Der mobile Testaufbau bietet gegenüber einer Erprobung direkt an einer Aufzugsanlage verschiedene Vorteile:

- schnelle und unkomplizierte Durchführung von Funktionstests und Kalibrierungen
- reproduzierbare Prüfbedingungen und definierte Belastungszustände
- Untersuchung verschiedener Nullpunkte und Kalibriersituationen
- Überprüfung der Messgenauigkeit bei Kleinlasten
- Vergleich der Messergebnisse mit anderen Lastmesssystemen
- einfache Wiederholung einzelner Prüfungen zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit
- Durchführung der Tests ohne Abhängigkeit von einer betriebsbereiten Aufzugsanlage
- Durchführung von Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten in einer geeigneten Büroumgebung

Die erste Phase dient somit primär der technischen Erprobung und Optimierung des Prototyps. Erkenntnisse aus den Messungen können unmittelbar in die Anpassung der Hard- und Software sowie in die Weiterentwicklung des Kalibrierverfahrens einfliessen.

Phase 2 – Praxiserprobung an einer realen Aufzugsanlage

In der zweiten Phase wird der optimierte Prototyp an einer realen Aufzugsanlage installiert und unter praxisnahen Betriebsbedingungen erprobt. Im Gegensatz zum Testaufbau aus Phase 1 stehen hierbei nicht mehr ausschliesslich der grundlegenden Funktionen des Auswertegeräts im Vordergrund. Vielmehr soll untersucht werden, wie sich das Gesamtsystem unter den tatsächlichen Einbau- und Betriebsbedingungen einer Aufzugsanlage verhält.

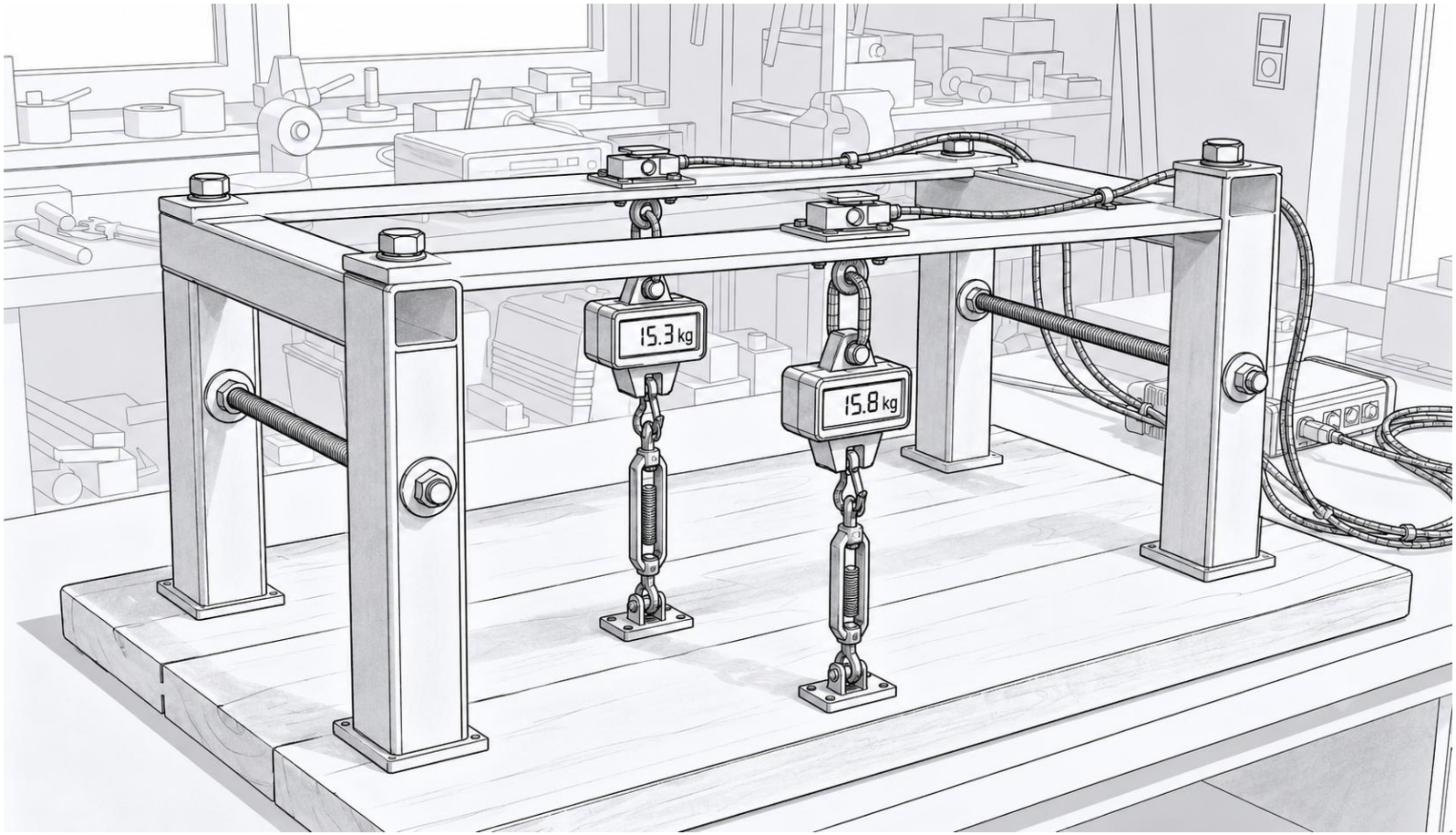
Ein Schwerpunkt dieser Phase bildet die Kalibrierung des Auswertegeräts unter realen Bedingungen. Dabei wird untersucht, ob das zuvor entwickelte und im Testaufbau erprobte Kalibrierverfahren auch bei einer tatsächlichen Installation zuverlässig angewendet werden kann. Gleichzeitig soll überprüft werden, ob Umgebungs- und Anlagenbedingungen einen relevanten Einfluss auf die Messung haben.

Ein weiterer Untersuchungsbereich ist die Bedienbarkeit des Auswertegeräts. Dabei werden unter anderem die Bedienung über die vorgesehene Benutzeroberfläche, die Anzeige der Messwerte sowie die Durchführung der Kalibrierung beurteilt. Ziel ist es, festzustellen, ob die Bedienung unter den Bedingungen einer realen Aufzugsanlage intuitiv und zuverlässig möglich ist.

Darüber hinaus wird die Messgenauigkeit im praxisrelevanten Lastbereich untersucht. Hierzu werden Lasten von mehreren hundert Kilogramm aufgebracht und die vom Auswertegerät ermittelten Werte mit geeigneten Referenzwerten beziehungsweise Vergleichsmessungen gegenübergestellt. Dadurch kann überprüft werden, ob die im Labor ermittelten Eigenschaften des Systems auch bei höheren Belastungen und unter realen Einsatzbedingungen reproduzierbar sind.

Die zweite Phase stellt somit die Praxiserprobung und Validierung des Gesamtsystems dar. Neben der eigentlichen Messgenauigkeit werden dabei auch Aspekte wie Kalibrierbarkeit, Bedienbarkeit, Reproduzierbarkeit und Verhalten unter realen Betriebsbedingungen beurteilt.

KONZEPTVISUALISIERUNG TESTAUFBAU



8 Konzeptvisualisierung Testaufbau

Quelle: ChatGPT

LEISTUNGSVERZEICHNIS

MS	Beschreibung	Leistungserbringer
1	Entwicklung und Layout PCB Beschaffung der notwendigen Zusatzkomponenten wie Mikroprozessor, Display etc.	Daniel Renggli
1	Herstellung PCB	JLCPCB
2	Konzeption Testaufbau Aufbau von Sensoren und elektrische Komponenten	Daniel Renggli
2	Herstellung Testaufbau mechanisch	EMCH Aufzüge AG
3	Entwicklung Software in C++	Daniel Renggli
4	Testsituationen simulieren Kalibrierungsverfahren testen Beschaffung der notwendigen Prüfmittel Dokumentation der Tests	Daniel Renggli
5	mechanische Installation an der Testanlage Testsituationen simulieren Dokumentation der Tests	Daniel Renggli
5	Bereitstellung Testanlage zur freien Verfügung	EMCH Aufzüge AG

3 Tabelle Leistungsverzeichnis

ABNAHMEKRITERIEN UND BEWERTUNG

Der entwickelte Prototyp muss in der Lage sein, den Zustand einer Aufzugskabine anhand der erfassten Last zuverlässig zu erkennen und das daraus resultierende Ergebnis fehlerfrei, nachvollziehbar und reproduzierbar auszugeben.

Im Rahmen der Abnahme werden sämtliche im Lastenheft definierten Soll- und Wunschziele systematisch analysiert, überprüft und bewertet. Die Sollziele stellen dabei die grundlegenden Anforderungen des Prototyps dar und müssen für eine erfolgreiche Abnahme erfüllt sein. Die Wunschziele werden hinsichtlich ihrer technischen Umsetzung und des erreichten Entwicklungsstandes beurteilt und entsprechend dokumentiert.

Da es sich beim entwickelten Gerät um einen Prototyp handelt und die tatsächlich erreichbare Messgenauigkeit im Rahmen der Entwicklung zunächst ermittelt werden muss, wird keine über die normativen Anforderungen hinausgehende absolute Genauigkeit als verbindliches Abnahmekriterium festgelegt. Als Mindestanforderung soll das entwickelte Messsystem jedoch die für die vorgesehene Anwendung relevanten Anforderungen der EN 81-20:2020 hinsichtlich der Lastmessung erfüllen.

Die Messgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und das Messverhalten des Prototyps werden im Rahmen einer definierten Versuchsreihe untersucht und dokumentiert.

Die Abnahme des Prototyps erfolgt somit anhand einer Kombination aus Funktionserfüllung, zuverlässiger Zustandserkennung, Reproduzierbarkeit, Einhaltung der relevanten normativen Mindestanforderungen und den dokumentierten Messergebnissen.

Auszug aus der EN81-20:2020

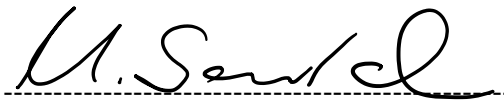
5.12.1.2.2

Eine Überlastung muss spätestens dann festgestellt werden, wenn die Nennlast um 10 %, mit einem Minimum von 75 kg, überschritten ist.

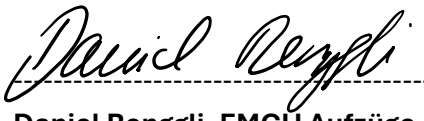
FREIGABE PFLICHTENHEFT

Mit der nachfolgenden Unterschrift wird das vorliegende Pflichtenheft freigegeben. Die darin beschriebenen Anforderungen und Randbedingungen bilden die Grundlage für die Entwicklung und anschliessende Abnahme des Projekts.

Auftraggeber / Kunde

Unterschrift	Ort / Datum
	Bern, 24.08.2026
Marc Santschi, EMCH Aufzüge AG	

Entwickler

Unterschrift	Ort / Datum
	Bern, 24.08.2026
Daniel Renggli, EMCH Aufzüge AG	

PROJEKTREALISIERUNG

MS1 ENTWICKLUNG PCB

Arduino UNO R4 WiFi

Als Ausgangslage für die Wahl des Mikrocontrollers wurde der Einsatz eines Entwicklerboards in Betracht gezogen. Ein solches Board bietet für die Entwicklung eines Prototyps verschiedene Vorteile, da wesentliche Komponenten wie Taktquelle, Programmier- und USB-Schnittstelle, Speicher sowie die erforderlichen GPIO-Anschlüsse bereits vorhanden sind.

Die erste Wahl fiel auf den Arduino UNO R4 WiFi. Ausschlaggebend waren insbesondere die integrierte WLAN-Funktionalität, welche die Realisierung eines Webinterfaces ermöglicht, sowie die Möglichkeit, die digitalen Ein- und Ausgänge mit einem Logikpegel von 5V zu betreiben. Dies erschien zunächst besonders vorteilhaft, da der KL66-Lastmesssensor ebenfalls ein 5V TTL-Signal ausgibt.

Bei einer detaillierteren Betrachtung zeigte sich jedoch, dass die Anzahl der verfügbaren GPIO-Anschlüsse für die geplante Anwendung knapp bemessen ist. Für den Prototyp werden acht Eingänge für die Bedientasten, ein Ausgang für die WiFi Status-LED, vier Ausgänge für die Relaisansteuerung sowie ein Eingang für das Frequenzsignal des Lastmesssensors benötigt. Damit werden insgesamt 14 GPIO-Anschlüsse benötigt. Somit wären praktisch keine Reserven für spätere Erweiterungen oder zusätzliche Funktionen vorhanden. Alternativ müsste die Anzahl der Bedientasten reduziert werden.

Ein weiterer Nachteil sind die grossen Abmessungen des Entwicklerboards von rund 70 × 50mm. Zudem ist der Arduino UNO R4 WiFi mit Buchsenleisten (Female Headers) ausgestattet. Bei einer direkten Integration in die eigens entwickelte Leiterplatte müsste das Entwicklerboard entweder auf der Rückseite der Leiterplatte angeordnet werden, wodurch insbesondere die Zugänglichkeit der USB-Schnittstelle erschwert würde, oder in umgekehrter Einbaulage montiert werden.

Das entscheidende Ausschlusskriterium stellte jedoch die Genauigkeit der Taktquelle dar. Der Arduino UNO R4 WiFi basiert auf einem 32 Bit-Mikrocontroller der Renesas RA4M1-Serie. Dieser verfügt unter anderem über einen internen HOCO (High-Speed On-Chip Oscillator). Gemäss Datenblatt weist der 48MHz-HOCO im Temperaturbereich von −20°C bis +85°C eine spezifizierte Frequenzgenauigkeit von +/-1% auf. Da beim entwickelten Auswertegerät die vom KL66 ausgegebene Frequenz zur Bestimmung der Last ausgewertet wird, hat die Genauigkeit der verwendeten Zeitbasis einen direkten Einfluss auf die Frequenzmessung. Insbesondere bei einer kleinen Frequenzänderung über den gesamten Lastbereich kann eine ungenaue Taktquelle einen relevanten Beitrag zur Messgenauigkeit leisten. Aus diesem Grund wurde die Taktgenauigkeit als wesentliches Auswahlkriterium für den Mikrocontroller definiert.

Der theoretische Einfluss einer Taktabweichung von +/-1% auf die Lastbestimmung wird im nachfolgenden Rechenbeispiel näher betrachtet.

Der Frequenzbereich des KL66-Lastmesssensors wird für dieses Rechenbeispiel mit 16500Hz bei 0kg und 17000Hz bei 1000kg angenommen. Bei einer angenommenen Genauigkeit der Taktquelle von +/-1% ergibt sich folgende Berechnung.

Frequenzabweichung bei 0kg: 16500Hz * 1% = 165Hz

Frequenzabweichung bei 1000kg: 17000Hz * 1% = 170Hz

Der gesamte nutzbare Frequenzbereich des Sensors beträgt: 17000Hz – 16500Hz = 500Hz

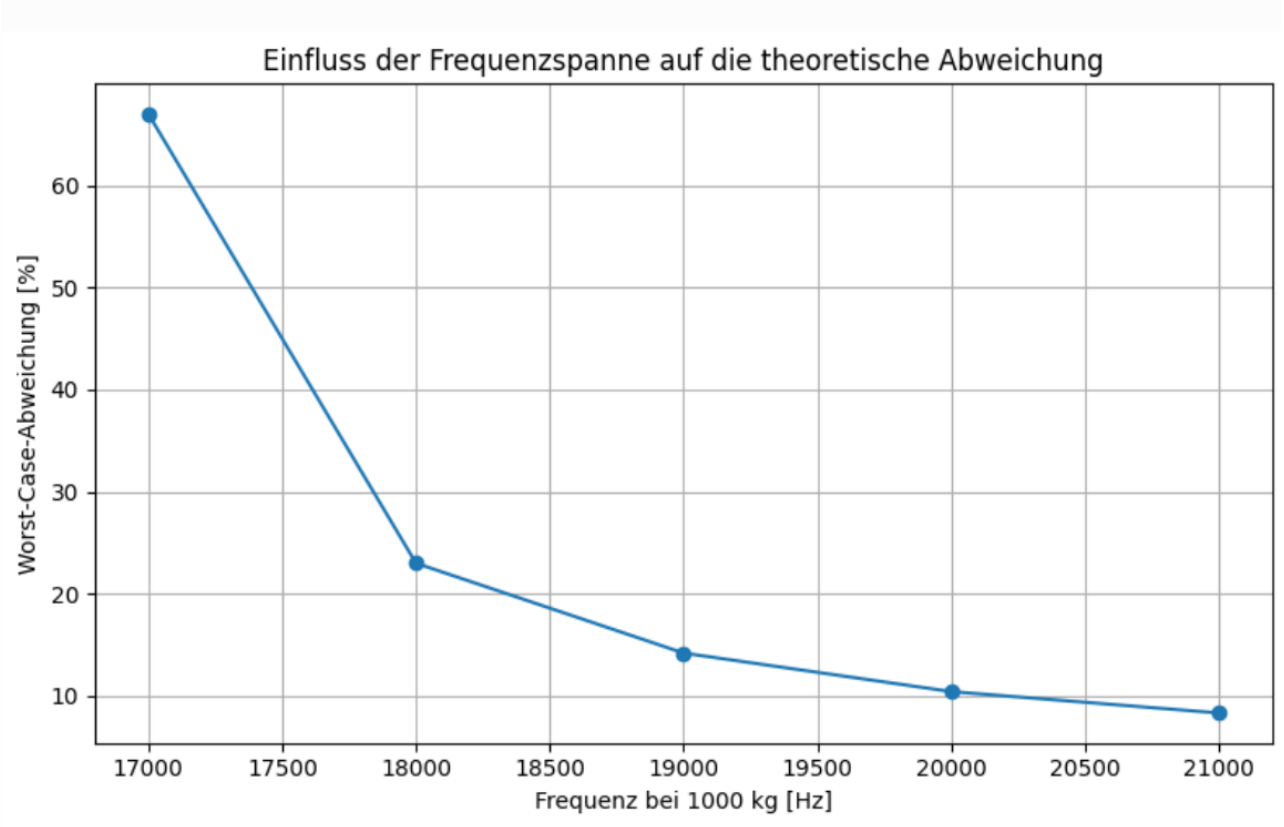
Bei einem Messbereich von 0 bis 1000kg entspricht dies einer theoretischen Gewichtsänderung pro Hertz von: 1000kg / 500Hz = 2kg/Hz

Maximale Frequenzabweichung an beiden Endpunkten: 165Hz + 170Hz = 335Hz

Diese Frequenzdifferenz entspricht einer Lastabweichung von: 335Hz * 2kg/Hz = 670kg

Bezogen auf den Messbereich von 1000kg entspricht dies: 670kg / 1000kg * 100 = 67%

Unter dieser Worst-Case-Annahme könnte die Toleranz der Taktquelle somit zu einer theoretischen Abweichung der ermittelten Messspanne von rund **670kg bzw. 67%** des gesamten Messbereichs führen.



9 Messabweichung Arduino UNO R4 WiFi

Quelle: ChatGPT

Der Arduino UNO R4 WiFi ist somit nicht brauchbar für diesen Zweck. Der Mikrocontroller muss eine deutlich genauere Taktquelle besitzen.



10 Arduino UNO R4 WIFI

Quelle: www.digitec.ch / ChatGPT

Raspberry Pi Pico 2 W

Als zweites Entwicklerboard wurde der Raspberry Pi Pico 2W näher untersucht. Dieser verfügt ebenfalls über eine integrierte WLAN-Funktionalität und eignet sich somit für die Realisierung des vorgesehenen Webinterfaces. Mit insgesamt 26 Multifunktions-GPIOs stehen deutlich mehr Ein- und Ausgänge zur Verfügung als beim zuvor betrachteten Arduino UNO R4 WiFi. Dadurch sind ausreichend Anschlüsse für die Bedientasten, Status-LEDs, Relaisansteuerung und die Frequenzmessung vorhanden. Gleichzeitig bleiben genügend GPIOs als Reserve für mögliche Erweiterungen des Prototyps verfügbar.

Der Logikpegel der GPIOs beträgt 3,3V. Das vom KL66-Lastmesssensor ausgegebene 5V TTL-Frequenzsignal kann daher nicht ohne entsprechende Pegelanpassung an den Mikrocontroller geführt werden.

Mit Abmessungen von ca. 50*20mm ist der Raspberry Pi Pico 2W wesentlich kleiner als der Arduino UNO R4 WiFi. Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit, das Entwicklerboard bereits mit bestückten Stiftleisten (Pin Headers) zu beziehen. Dadurch kann das Board über entsprechende Buchsenleisten von oben auf die Leiterplatte aufgesteckt werden. Dies ermöglicht eine einfache Montage und Demontage und gewährleistet gleichzeitig eine gute Zugänglichkeit der USB-Schnittstelle.

Der Raspberry Pi Pico 2W verfügt über keinen separaten EEPROM-Speicher. Für die dauerhafte Speicherung stehen jedoch 4MB Flash-Speicher zur Verfügung. Dieser bietet für die vorgesehene Anwendung ausreichend Speicherkapazität. Neben dem Programmcode können darin auch die für das Auswertegerät benötigten Konfigurations- und Kalibrierdaten dauerhaft gespeichert werden.

> Flash-Speicher dient hauptsächlich zur dauerhaften Speicherung des Programmcodes. EEPROM-Speicher wird hingegen häufig zur Speicherung veränderbarer Parameter und Konfigurationsdaten eingesetzt, welche auch nach dem Ausschalten des Geräts erhalten bleiben müssen. Da der Raspberry Pi Pico 2W über keinen separaten EEPROM verfügt, können die benötigten Kalibrier- und Konfigurationsdaten in einem dafür vorgesehenen Bereich des Flash-Speichers abgelegt werden.
>
> *Quelle: ChatGPT*

Ein wesentlicher Unterschied zum Arduino UNO R4 WiFi liegt in der verwendeten Taktquelle. Der Raspberry Pi Pico 2 W basiert auf dem RP2350 Mikrocontroller, dessen externe Taktreferenz durch einen 12MHz Quarz vom Typ Abracon ABM8-272-T3 bereitgestellt wird.

Gemäss Datenblatt weist dieser Quarz bei einer Temperatur von 25°C eine Frequenztoleranz von +/-30ppm auf. Dies entspricht einer relativen Abweichung von lediglich +/-0,003%.

Dasselbe Rechenbeispiel wie beim Arduino UNO R4 WiFi wird nun mit der Abweichung des Raspberry Pi Pico 2W durchgeführt.

Der Frequenzbereich des KL66-Lastmesssensors wird für dieses Rechenbeispiel mit 16500Hz bei 0kg und 17000Hz bei 1000kg angenommen. Bei einer angenommenen Genauigkeit der Taktquelle von +/-0,003% ergibt sich folgende Berechnung.

Frequenzabweichung bei 0 kg:16500Hz * 0,003% = 0,495Hz

Frequenzabweichung bei 1000kg: 17000Hz * 0,003% = 0,510Hz

Der gesamte nutzbare Frequenzbereich des Sensors beträgt: 17000Hz − 16500Hz = 500Hz

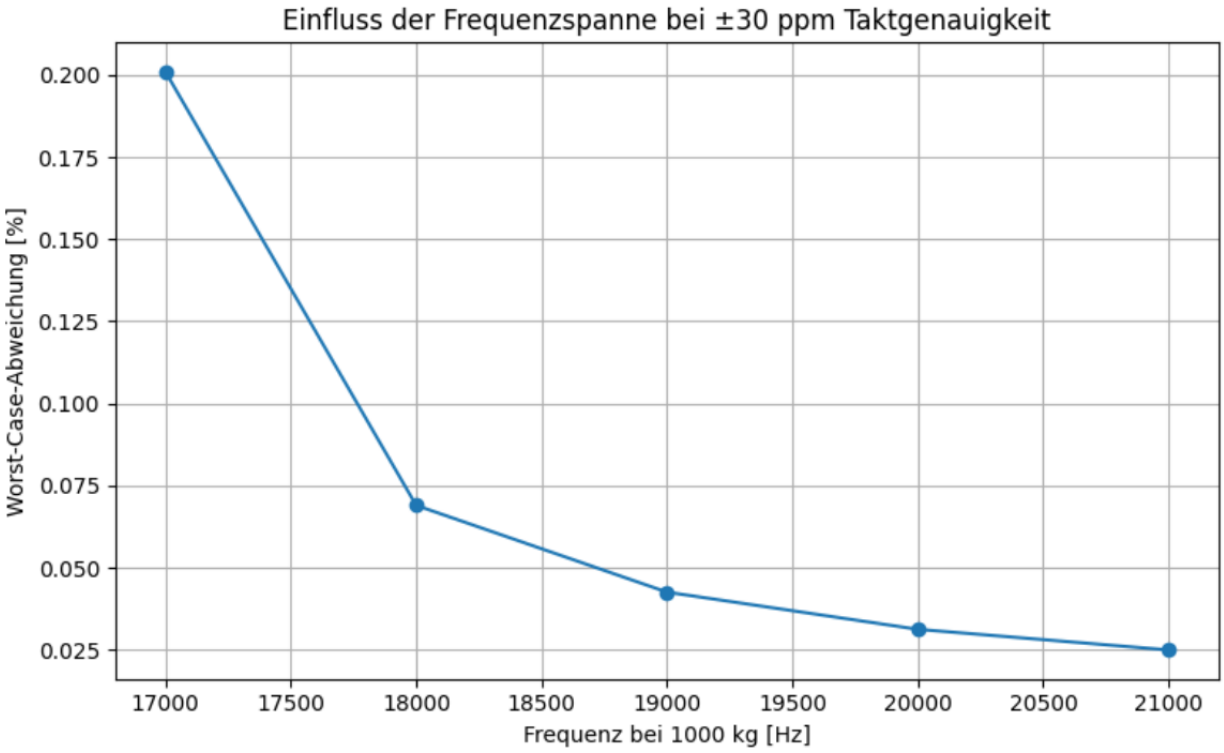
Bei einem Messbereich von 0 bis 1000 kg entspricht dies einer theoretischen Gewichtsänderung pro Hertz von: 1000kg / 500Hz = 2kg/Hz

Maximale Frequenzabweichung an beiden Endpunkten: 0,495Hz + 0,510Hz = 1,005Hz

Diese Frequenzdifferenz entspricht einer Lastabweichung von: 1,005Hz * 2kg/Hz = 2,01kg

Bezogen auf den Messbereich von 1000 kg entspricht dies: 2,01kg / 1000kg * 100 = 0,201%

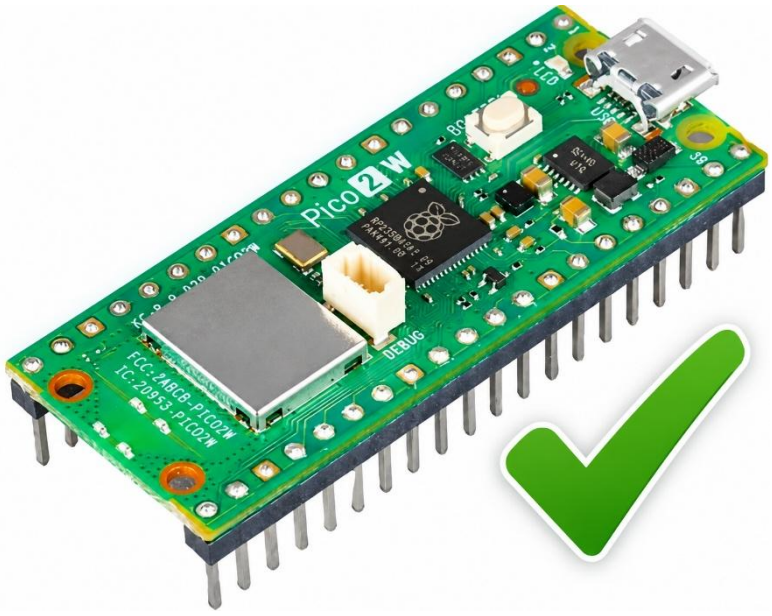
Unter dieser Worst-Case-Annahme könnte die Toleranz der Taktquelle somit zu einer theoretischen Abweichung der ermittelten Messspanne von rund **2,01kg bzw. 0,201%** des gesamten Messbereichs führen.



11 Messabweichung Raspberry Pi Pico 2W

Quelle: ChatGPT

Aufgrund dieser sehr kleinen Messabweichung, seiner Grösse und den genügenden GPIO`s ist der Raspberry Pi Pico 2W sehr gut geeignet.



12 Raspberry Pi Pico 2W

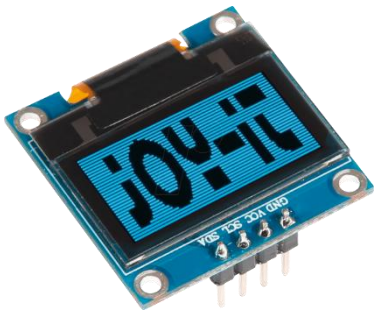
Quelle: www.brack.ch / ChatGPT

OLED

Als Display wird das SSD1306 mit Pin-Headern zum Aufstecken eingesetzt. Diese Ausführung ermöglicht eine schnelle Montage und einen einfachen Austausch des Displays im Falle eines Defekts.

Das OLED-Display besitzt eine Bildschirmdiagonale von 1 Zoll und eine Auflösung von 128 × 64 Pixeln. Es zeichnet sich durch seine kompakte Bauform und die geringen Kosten aus. Die Ansteuerung erfolgt über eine I^2C-Schnittstelle, wodurch nur wenige Signalleitungen benötigt werden und die Einbindung in das System einfach umgesetzt werden kann. Zudem kann das Display mit 3.3V betrieben werden.

Für die Anforderungen des Prototyps bietet das SSD1306 einen ausreichenden Funktionsumfang und stellt somit eine zweckmässige und kostengünstige Lösung dar.



13 Display SSD1306

Quelle: www.reichelt.com

Kleinbauteile PCB

Für die übrigen elektronischen Komponenten, wie beispielsweise Widerstände, DC/DC-Wandler, Kondensatoren, Optokoppler, Dioden, Anschlussklemmen, Taster und LEDs, wurden überwiegend Standardbauteile verwendet, die beim Leiterplattenhersteller JLCPCB in grosser Stückzahl verfügbar sind. Eine hohe Verfügbarkeit bietet neben einer guten Beschaffungssicherheit in der Regel auch wirtschaftliche Vorteile, da häufig verwendete Standardkomponenten meist kostengünstiger erhältlich sind.

Trotz der Auswahl gut verfügbarer Standardbauteile wurde für jede Komponente das entsprechende Datenblatt geprüft. Dabei wurden insbesondere die zulässigen Spannungen und Ströme, Kapazitätswerte sowie die maximale Leistung beziehungsweise Verlustleistung berücksichtigt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die eingesetzten Bauteile für die vorgesehenen Betriebsbedingungen ausreichend dimensioniert sind.

Bei der Auswahl der Optokoppler wurde zusätzlich auf eine ausreichend kurze Schaltzeit beziehungsweise eine hohe Schaltgeschwindigkeit geachtet, damit das Frequenzsignal des Lastmesssensors zuverlässig und ohne relevante Beeinträchtigung übertragen werden kann.

Eine detaillierte Auflistung aller verwendeter Bauteile inklusive Bauteilenummer ist im Anhang aufgeführt.

Schema TINA-TI

Ein PCB basiert auf einem elektrischen Schaltplan, in welchem die benötigten elektronischen Bauteile sowie deren elektrischen Verbindungen dargestellt sind. Um zunächst einen übersichtlichen Gesamtentwurf der Schaltung zu erhalten, wurde diese in einem ersten Schritt mit der Simulationssoftware TINA-TI erstellt.

> TINA-TI ist eine kostenlose Simulationssoftware von Texas Instruments zur Analyse und Simulation elektronischer Schaltungen. Mit der Software können Schaltungen virtuell aufgebaut und deren elektrisches Verhalten untersucht werden. Dabei lassen sich unter anderem Spannungen, Ströme und Signalverläufe an verschiedenen Punkten der Schaltung darstellen und analysieren.
>
> *Quelle: ChatGPT*

TINA-TI eignet sich aufgrund der übersichtlichen Darstellung und der einfachen Bedienung gut für die Erstellung eines ersten Schaltungsentwurfs. In dieser Phase lag der Fokus noch nicht auf der exakten Dimensionierung oder Auswahl der einzelnen Bauteile. So wurde beispielsweise zunächst festgelegt, an welcher Stelle ein Widerstand benötigt wird, ohne dessen genauen Widerstandswert bereits zu bestimmen. Eine Simulation und Analyse des elektrischen Verhaltens, beispielsweise hinsichtlich der auftretenden Ströme und Spannungen, war in dieser Phase nicht Bestandteil der Betrachtung.

Das mit TINA-TI erstellte Prinzipschema ist im Anhang dieser Arbeit dargestellt.

Schema KiCad

Mit der TINA-TI Grundlage wurde das definitive Schema im Programm KiCad 9.0 aufgezeichnet.

> KiCad ist eine frei verfügbare Open-Source-Software zur Entwicklung elektronischer Schaltungen und Leiterplatten (PCB). Die Software stellt verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, mit denen Schaltpläne erstellt, elektronische Bauteile definiert und daraus Leiterplattenlayouts entwickelt werden können. Zusätzlich ermöglicht KiCad eine dreidimensionale Darstellung der entworfenen Leiterplatte.
>
> *Quelle: ChatGPT*

Das Schema ist in drei Bereiche unterteilt. Der erste Bereich stellt die Spannungsversorgung und Einspeisung der Schaltung dar. Der zweite Bereich umfasst sämtliche Signale, die zum Mikrocontroller geführt oder von diesem ausgegeben werden, einschliesslich der Anbindung des Displays. Der dritte Bereich beinhaltet die Ansteuerung der Relaisstufe.

Einspeisung

Die Schaltung wird mit einer Betriebsspannung von 24VDC versorgt. Eine in Serie geschaltete Diode dient als Verpolungsschutz und schützt die nachfolgende Elektronik bei einem fehlerhaften Anschluss der Versorgungsspannung.

Über einen galvanisch getrennten DC/DC-Wandler wird die Eingangsspannung von 24VDC auf 5 VDC umgesetzt. Dieser erste 5V Spannungsbereich dient hauptsächlich zur Versorgung der Lastmesssensoren. Aus diesem 5V Spannungsbereich wird über einen weiteren galvanisch getrennten DC/DC-Wandler ein zweiter, elektrisch isolierter 5V Spannungsbereich erzeugt. Dieser dient zur Versorgung des Mikrocontrollers, Optokoppler sowie des Displays. Durch diese Aufteilung wird die Versorgung der Sensorik und die Versorgung der Auswerteelektronik galvanisch voneinander getrennt.

Die vorhandenen Versorgungsspannungen werden jeweils durch eine Status-LED angezeigt. An den Ein- und Ausgängen der DC/DC-Wandler sind entsprechende Stützkondensatoren vorgesehen. Diese dienen zur Stabilisierung der Versorgungsspannungen und zur Reduzierung von Störungen und kurzzeitigen Spannungsschwankungen.

Zusätzlich sind ESD- bzw. Überspannungsschutzdioden vorgesehen, welche die nachfolgenden Schaltungsteile und insbesondere die DC/DC-Wandler vor Überspannungen schützen.

Die galvanische Trennung dient dazu, unterschiedliche Stromkreise elektrisch voneinander zu entkoppeln. Dadurch besteht zwischen den getrennten Bereichen keine direkte leitende Verbindung. Dies reduziert die Gefahr von unerwünschten Ausgleichsströmen aufgrund unterschiedlicher Massepotenziale und kann die Übertragung leitungsgebundener Störungen vermindern.

Da das Auswertegerät in einer Aufzugsanlage eingesetzt wird, können durch Frequenzumrichter, Motoren, Schütze und weitere elektrische Komponenten Störungen auftreten. Durch die galvanische Trennung wird die empfindliche Elektronik des Auswertegeräts von der Anlagenseite entkoppelt und somit die Robustheit des Systems gegenüber solchen Einflüssen erhöht.

Quelle: ChatGPT

Mikrocontroller

Der Mikrocontroller, das Display, die Lastmesssensoren sowie die Optokoppler sind ebenfalls mit entsprechenden Speisungskondensatoren und ESD-Schutzdioden versehen.

Die Bedientasten sind über Pull-up-Widerstände mit den GPIO-Eingängen des Mikrocontrollers verbunden. Die Tasten «AUF», «AB», «LINKS» und «RECHTS» dienen zur Navigation innerhalb der Menüstruktur. Mit der Taste «OK» können Eingaben bestätigt oder Funktionen ausgewählt werden. Die Taste «ESC» ermöglicht es dem Benutzer, innerhalb der Menüführung einen Schritt zurückzugehen. Über die Taste «HOME» kann unabhängig von der aktuellen Menüposition direkt zur Hauptanzeige des Displays zurückgekehrt werden.

Für einen Neustart des Mikrocontrollers steht die Taste «RESET» zur Verfügung. Mit der Taste «WIFI» kann das Webinterface aktiviert werden. Der aktuelle Zustand dieser Funktion wird zusätzlich über eine Status-LED angezeigt.

Das Display ist über eine I^2C-Schnittstelle mit dem Mikrocontroller verbunden. Dadurch werden für die Kommunikation die beiden Signalleitungen SDA und SCL benötigt.

Die von den Lastmesssensoren ausgegebenen 5V TTL-Signale werden über Optokoppler an die entsprechenden Eingänge des Mikrocontrollers übertragen. Dadurch können die Sensorsignale ausgewertet werden, ohne die galvanische Trennung zwischen der Sensorseite und der Auswerteelektronik aufzuheben.

Da noch freie GPIO-Anschlüsse am Mikrocontroller zur Verfügung stehen, wurde ein zweiter Anschluss für einen Lastmesssensor vorgesehen. Dieser dient, bei einem möglichen Defekt des Optokopplers oder GPIO als Reserve.

Relaisstufe

Die vier potenzialfreien Relaisausgänge verfügen jeweils über einen Schliesser- (NO) und einen Öffnerkontakt (NC) und ermöglichen dadurch eine flexible Anbindung an die Aufzugssteuerung. Der jeweilige Schaltzustand der Relais wird zusätzlich über eine Status-LED angezeigt.

Da die GPIO-Ausgänge des Mikrocontrollers nicht für die direkte Ansteuerung der Relaisspulen ausgelegt sind, erfolgt die Ansteuerung über einen Darlington-Treiber. Dieser ermöglicht es, mit den Steuersignalen des Mikrocontrollers den erforderlichen Spulenstrom der Relais zu schalten.

Zum Schutz der Elektronik ist jede Relaisspule mit einer Freilaufdiode versehen. Diese begrenzt die beim Abschalten der Relaisspule entstehende induktive Spannungsspitze und schützt dadurch die Treiberschaltung vor möglichen Beschädigungen.

Die KiCad Schemablätter sowie eine Auflistung der Klemmenbelegung des Raspberry Pico 2W sind im Anhang aufgeführt.

BERECHNUNGEN

Vorwiderstand Status-LED 24V

Die eingesetzte LED weist gemäss Datenblatt eine Vorwärtsspannung von 1,6V bis 2,6V sowie einen maximal zulässigen Vorwärtsstrom von 25mA auf.

Da die LED lediglich als Statusanzeige dient und während des Betriebs dauerhaft leuchtet, wird der LED-Strom bewusst niedrig gehalten. Dadurch werden sowohl die Stromaufnahme als auch die Verlustleistung am Vorwiderstand reduziert. Aus diesem Grund wurde ein Vorwiderstand von 10kΩ gewählt.

Für die Berechnung wird eine typische Vorwärtsspannung der LED von 2,1V angenommen. Bei einer Versorgungsspannung von 24V ergeben sich folgende Berechnungen:

$I = U/R = (24V - 2.1V) / 1k\Omega = \underline{2.19mA}$

$P_{RV} = I^2*R = (2.19mA)^2*10k\Omega = \underline{48mW}$

$P_D = U_D * I = 2.1V * 2.19mA = \underline{4.6mW}$

Der resultierende LED-Strom von 2,19mA liegt deutlich unterhalb des maximal zulässigen Vorwärtsstroms von 25mA und ist für den Einsatz als Statusanzeige ausreichend.

Vorwiderstand Staus-LED 5V

Für die Status-LED des 5V Bereichs wurde dieselbe LED wie im 24V Teil eingesetzt. Der Vorwiderstand wurde basierend auf folgender Berechnung mit 1kΩ dimensioniert. Auch hier wurde der Strom bewusst tief gehalten.

$I = U/R = (5V - 2.1V) / 1k\Omega = \underline{2.9mA}$

$P_{RV} = I^2*R = (2.9mA)^2*1k\Omega = \underline{8.4mW}$

$P_D = U_D * I = 2.1V * 2.9mA = \underline{6.1mW}$

Vorwiderstand Staus-LED WiFi

Zur Signalisierung ob da WiFi aktiv ist wurde ebenfalls dieselbe LED eingesetzt. Diese wird vom GPIO gespiesen und hat damit nur eine Versorgungsspannung von 3.3V. Somit wurde der Widerstand auf 470Ω dimensioniert.

$I = U/R = (3.3V - 2.1V) / 470\Omega = \underline{2.55mA}$

$P_{RV} = I^2*R = (2.55mA)^2*470\Omega = \underline{3.06mW}$

$P_D = U_D * I = 2.1V * 2.55mA = \underline{5.4mW}$

Pull-up-Widerstände Bedientasten

Für die Bedientasten wurde ein Pull-up-Widerstand von 10kΩ gewählt. Dies ist in der Praxis ein häufiger und guter Wert für digitale Eingänge. Somit werden die Eingänge nicht mit einem grossen Strom belastet.

$I = U/R = 3.3V/10k\Omega =$ 0.33mA

$P_R = I^2*R = (0.33mA)^2*10k\Omega =$ 1.1mW

Pull-up-Widerstände I²C / Optokoppler

Die I²C-Leitungen sowie der Ausgang des Optokopplers sind jeweils mit 4,7kΩ Pull-up-Widerständen versehen. Der Widerstandswert wurde bewusst etwas niedriger gewählt, um ein schnelles und störsicheres Schaltverhalten der Signale zu gewährleisten.

Der Pull-up-Widerstand bildet zusammen mit den parasitären Kapazitäten der Leiterbahnen und der angeschlossenen Eingänge ein RC-Glied. Durch die Wahl eines kleineren Widerstandswerts wird der Strom vergrössert und somit die Zeitkonstante reduziert. Dadurch können die vorhandenen Kapazitäten schneller aufgeladen werden und der Signalpegel erreicht den HIGH-Zustand entsprechend schneller.

Insbesondere bei digitalen Kommunikations- und Frequenzsignalen ermöglicht dies steilere Signalflanken und trägt zu einer zuverlässigen Signalauswertung bei.

$I = U/R = 3.3V/4.7k\Omega =$ 0.7mA

$P_R = I^2*R = (0.7mA)^2*4.7k\Omega =$ 2.3mW

Klassische Werte für Pull-up-Widerstände sind:

1kΩ → starker Pull-up, höherer Strom

4,7kΩ → sehr häufig verwendet

10kΩ → Standardwert für viele digitale Signale

47kΩ → schwacher Pull-up, geringer Stromverbrauch

100kΩ → sehr schwacher Pull-up, eher für unkritische/langsame Signale

Quelle: ChatGPT

Vorwiderstand Optokoppler

Gemäss Datenblatt weist die Eingangsdiode des verwendeten Optokopplers eine Vorwärtsspannung von 1,2V bis 1,9V auf. Für die Berechnung wird mit dem Mittelwert von 1,55V gearbeitet. Der für einen zuverlässigen Betrieb vorgesehene Diodenstrom liegt zwischen 2mA und 6mA. Insbesondere ist darauf zu achten, dass der Mindeststrom nicht unterschritten wird, damit der Optokoppler zuverlässig schaltet. Das vom KL66 ausgegebene 5V TTL-Signal wurde mit dem Oszilloskop überprüft. Dabei wurde im HIGH-Zustand eine tatsächliche Spannung von rund 4,5V gemessen. Aus diesem Grund wird für die Dimensionierung des Vorwiderstands mit diesem gemessenen Wert gerechnet.

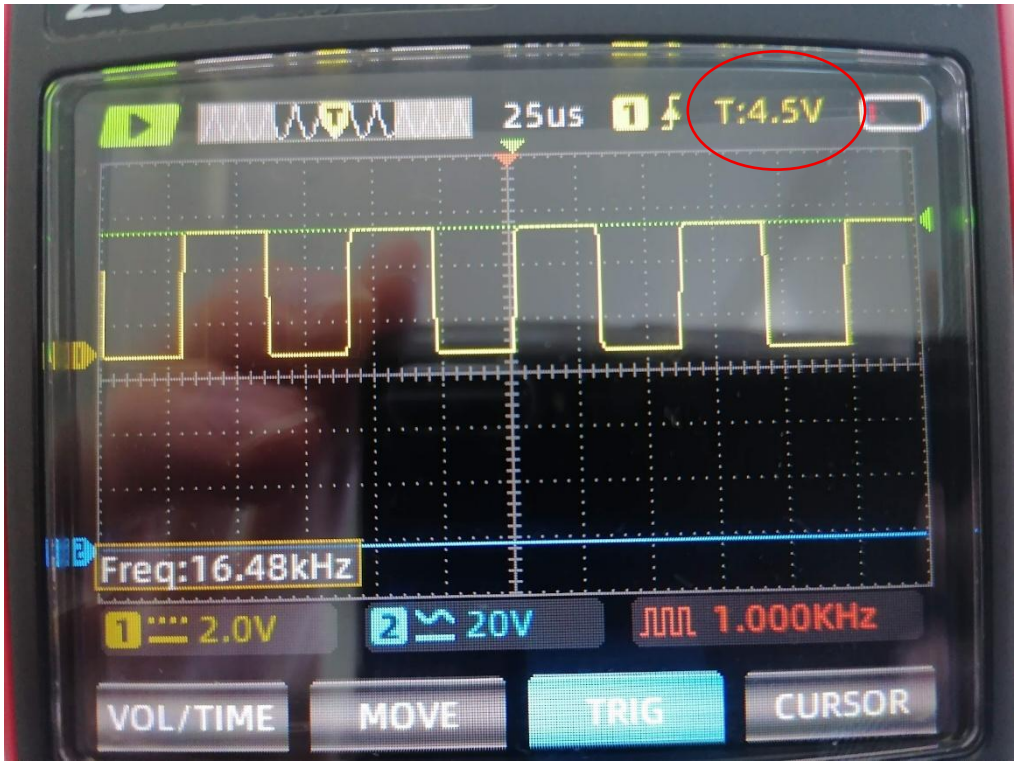
Für einen Vorwiderstand von 680Ω ergibt sich folgender Diodenstrom:

$I = U/R = (4.5V-1.55V) / 680Ω = \underline{4.34mA}$

$P_{RV} = I^2*R = (4.34mA)^2*680Ω = \underline{12.8mW}$

$P_D = U_D * I = 1.55V * 4.34mA = \underline{6.7mW}$

Der resultierende Diodenstrom von rund 4,34mA liegt ungefähr in der Mitte des vorgesehenen Bereichs von 2mA bis 6mA. Dadurch ist sowohl zur unteren als auch zur oberen Grenze ausreichend Reserve vorhanden. Aus diesem Grund wurde für den Eingang des Optokopplers ein Vorwiderstand von 680Ω gewählt.



14 Messung TTL-Signal Oszilloskop

Leistungsbilanz PCB

Bauteil	Leistung in mW	Anzahl	Gesamtleistung in mW
Raspberry Pi Pico 2W	1000	1	1000
SSD1306	100	1	100
Vorwiderstand 24V LED	48	1	48
24 V LED	4.6	1	4.6
Vorwiderstand 5V LED	8.4	6	50.4
5V LED	6.1	6	36.6
Vorwiderstand WiFi LED	3.06	1	3.06
WiFi LED	5.4	1	5.4
Bedientasten	1.1	8	8.8
I2C Leitung	2.3	2	4.6
Optokoppler Signalausgang	2.3	2	4.6
Vorwiderstand Optokoppler	12.8	2	25.6
Diode Optokoppler	6.7	2	13.4
Relaisspulen	400	4	1600
Reserve	100	1	100
Total			**3005.06**

4 Tabelle Leistungsbilanz PCB

Für den Raspberry Pi Pico 2W inklusive aktiviertem WLAN-Chip wurde für die Leistungsberechnung eine Leistungsaufnahme von 1W angenommen. Dieser Wert beinhaltet eine ausreichende Reserve, da die tatsächliche Leistungsaufnahme abhängig vom jeweiligen Betriebszustand und insbesondere von der WLAN-Aktivität variiert. Für das OLED-Display wurde eine Leistungsaufnahme von 100mW angenommen. Die verwendeten Werte basieren auf einer KI-gestützten Recherche.

Die Tabelle zeigt den theoretischen Leistungsbedarf bei maximaler Auslastung. Dabei wird vom ungünstigsten Betriebszustand ausgegangen. Sämtliche Taster sind betätigt, alle Relais angezogen, alle Status-LEDs eingeschaltet und die entsprechenden Signalleitungen permanent auf GND gezogen.

Dieser Betriebszustand wird im normalen Betrieb nicht auftreten. Die berechnete Gesamtleistung stellt daher einen konservativen Maximalwert dar.

Footprints

Jedes im Schaltplan verwendete Bauteil benötigt einen passenden Footprint, damit es anschliessend auf der Leiterplatte platziert werden kann. Der Footprint definiert die mechanischen Abmessungen und Anschlusspositionen eines Bauteils. Dazu gehören unter anderem die Abstände und Abmessungen der Lötpads, Bohrungsdurchmesser sowie die äusseren Abmessungen des Bauteils.

Viele standardisierte Footprints sind bereits in den Bibliotheken von KiCad vorhanden. Eine Herausforderung besteht jedoch darin, aus der grossen Anzahl verfügbarer Footprints den exakt passenden auszuwählen. Die Abmessungen müssen deshalb jeweils mit den Angaben im Datenblatt des verwendeten Bauteils verglichen werden. Ein falsch gewählter Footprint kann dazu führen, dass das entsprechende Bauteil später nicht oder nur fehlerhaft auf der produzierten Leiterplatte montiert werden kann.

Für einige der eingesetzten Komponenten, insbesondere für die DC/DC-Wandler, war in den vorhandenen KiCad-Bibliotheken kein exakt passender Footprint verfügbar. In diesen Fällen musste anhand der mechanischen Angaben und Masszeichnungen im jeweiligen Datenblatt ein eigener Footprint im KiCad Footprinteditor erstellt werden.

Die manuelle Erstellung eines Footprints ist mit zusätzlichem Zeitaufwand verbunden und erfordert eine sorgfältige Kontrolle sämtlicher Abmessungen. Gleichzeitig besteht ein erhöhtes Risiko für Fehler, da bereits geringe Abweichungen bei Padpositionen, Bohrungen oder Abständen dazu führen können, dass das Bauteil später nicht korrekt auf die Leiterplatte passt.

Gehäuse

Für den Prototyp wurde das Gehäuse CUBO S SPCM131808T verwendet. Mit den Abmessungen von 125*175*75mm bietet es ausreichend Platz für die benötigten Komponenten und weist gleichzeitig eine kompakte Bauform auf.

Das Gehäuse ist mit einem transparenten Plexiglasdeckel ausgestattet. Dadurch bleiben die Informationen auf dem Display sowie die Zustände der Status-LED`s auch bei geschlossenem Gehäuse gut sichtbar. Gleichzeitig bietet das Gehäuse einen guten mechanischen Schutz für die verbaute Elektronik.

Für die Leitungseinführungen können Kabelverschraubungen eingesetzt werden, wodurch eine sichere Kabelführung und eine zuverlässige Zugentlastung gewährleistet werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass dieser Gehäusetyp bereits bei EMCH Aufzüge AG im Lagerbestand vorhanden ist.



15 CUBO S SPCM131808T

Quelle: www.legrand.fi

Disposition PCB

Als erster Schritt wurden die Abmessungen der Leiterplatte auf 100*110mm festgelegt. Diese Abmessungen orientieren sich an den Innenmassen des gewählten Gehäuses. Dadurch kann die Leiterplatte mithilfe von Abstandhaltern (3D Muttern) sicher im Gehäuse befestigt werden.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Erstellung des PCB-Layouts ist die sinnvolle Anordnung der einzelnen Bauteile. Dabei muss einerseits sichergestellt werden, dass sämtliche Komponenten auf der verfügbaren Fläche Platz finden. Andererseits sollen die Bauteile logisch, übersichtlich und bedienerfreundlich angeordnet werden.

Ein Ziel der Bauteilanordnung war eine klare Trennung der verschiedenen Anschlüsse. Die Leitungen, welche von der Aufzugsteuerung zum Auswertegerät geführt werden, sollen auf einer Seite der Leiterplatte angeschlossen werden, während sich die Anschlüsse für die Sensoren auf der gegenüberliegenden Seite befinden. Zusätzlich wurde darauf geachtet, Bauteile unterschiedlicher Spannungsbereiche räumlich voneinander zu trennen. Dadurch können Kreuzungen von Leiterbahnen mit unterschiedlichen Spannungspotenzialen auf ein Minimum reduziert und eine übersichtliche Leiterbahnführung ermöglicht werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Anordnung der Bedienelemente. Die Taster wurden so positioniert, dass ihre Anordnung logisch und eine intuitive Bedienung möglich ist. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die Sicht auf das Display während der Bedienung der Tasten jederzeit frei bleibt.

Auch die Zugänglichkeit der Anschlüsse wurde bei der Platzierung berücksichtigt. Für die angeschlossenen Leitungen muss ausreichend Platz vorhanden sein, damit diese problemlos eingeführt und angeschlossen werden können. Ebenso dürfen wichtige Schnittstellen, wie beispielsweise der USB-Anschluss des Microcontrollers, nicht durch andere Bauteile oder angeschlossene Leitungen verdeckt beziehungsweise blockiert werden.

Für den Benutzer ist zusätzlich eine gute Beschriftung der Bauteile, welche für die Bedienung relevant sind, unerlässlich.

Durch die Berücksichtigung dieser Anforderungen konnte eine übersichtliche, bedienerfreundliche und für den vorgesehenen Einbau geeignete Anordnung der Komponenten auf der Leiterplatte realisiert werden.

Lagenaufbau

Für den Protoypen wurde ein 4-lagiges PCB gewählt und ist wie folgt aufgebaut.

Toplayer	Signale
Layer 2	GND_24V / GND_5V Flächen
Layer 3	5V / 3.3V Flächen
Bottomlayer	Signale

5 Tabelle Lagenaufbau PCB

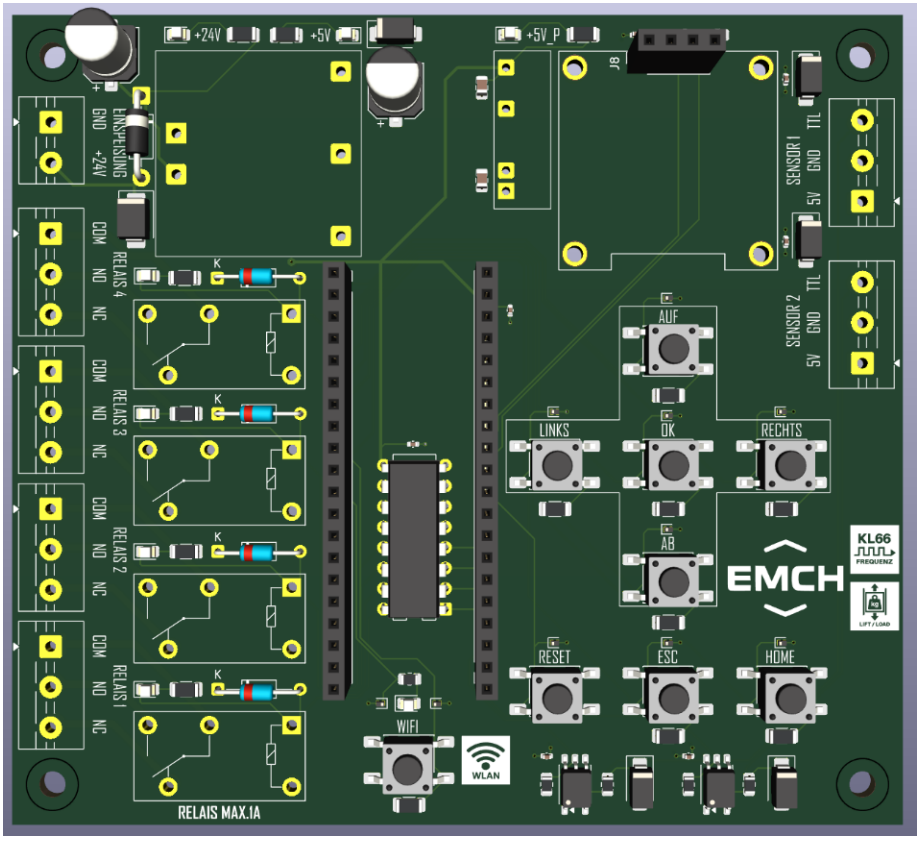
Routing

Nachdem sämtliche Bauteile auf der Leiterplatte platziert waren, wurden die GND- und Versorgungsspannungsflächen definiert. Dadurch konnten die Masse- und Versorgungsanschlüsse der einzelnen Bauteile auf kurzem Weg mit den entsprechenden Kupferflächen verbunden werden. Wo erforderlich, erfolgte die Verbindung zwischen den verschiedenen Lagen mithilfe von Vias.

Die übrigen Signalverbindungen wurden als Leiterbahnen auf dem Top Layer beziehungsweise dem Bottom Layer geführt. Vereinzelt wurden im Schaltplan die Zuordnungen der GPIO-Anschlüsse der Taster sowie der NC/NO Anschlüsse der Relais angepasst. Dadurch konnten unnötige Kreuzungen der Leiterbahnen vermieden und eine übersichtlichere Leiterbahnführung realisiert werden.

Grundsätzlich wurden die Leiterbahnen mit einer Standardbreite von 0,2mm ausgeführt. Leiterbahnen mit höherer Strombelastung, insbesondere im Bereich der Spannungseinspeisung und der Relaisversorgung, wurden mit einer Breite von 0,4mm ausgeführt. Durch die grössere Leiterbahnbreite wird der elektrische Widerstand reduziert und damit auch die Verlustleistung beziehungsweise die Erwärmung der Leiterbahn verringert.

3D Ansicht PCB



16 3D Ansicht PCB

Quelle: KiCad

Eine detaillierte 2D Ansicht sämtlicher Lagen ist im Anhang aufgeführt.

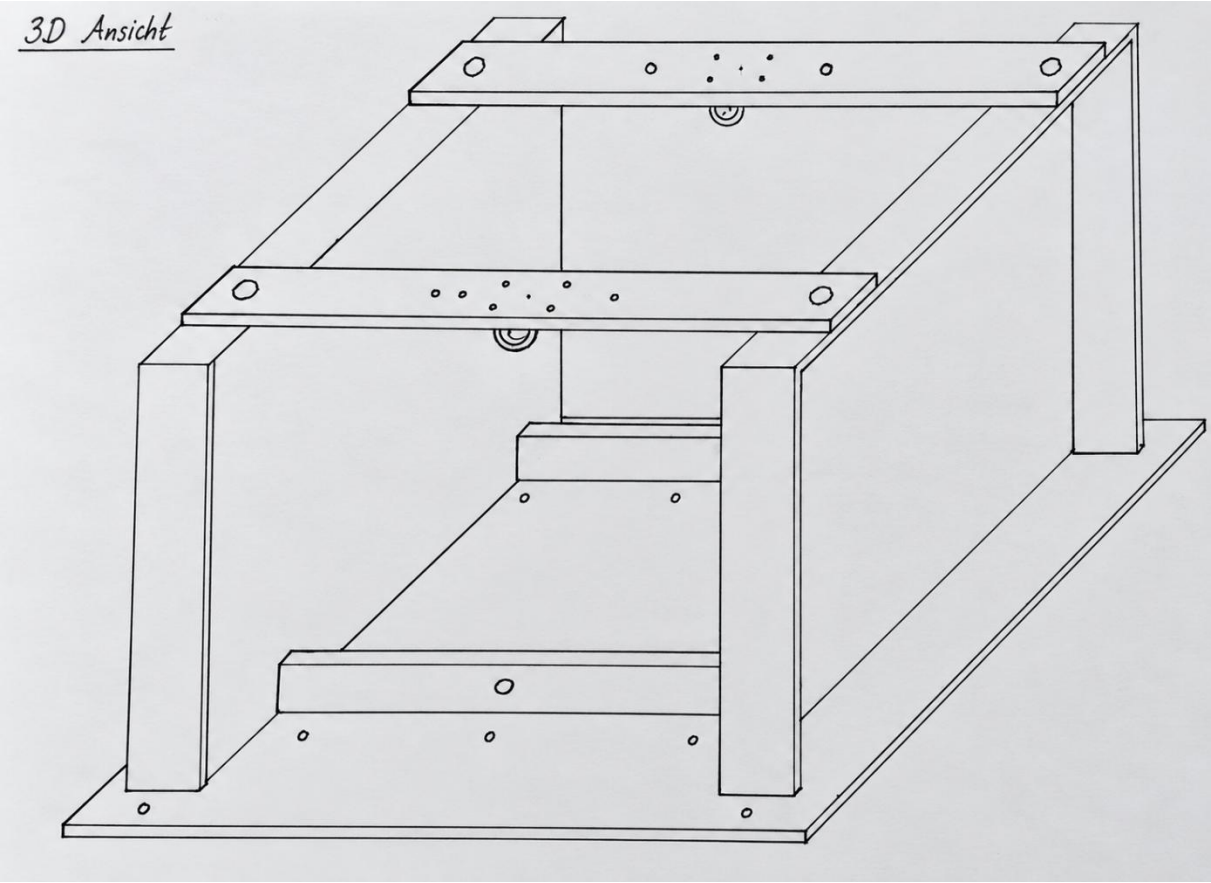
MS2 HERSTELLUNG TESTAUFBAU

Erstellung Skizzen

Auf Basis der zuvor erstellten Visualisierung im Pflichtenheft wurde ein Testaufbau entwickelt. Dieser sollte möglichst einfach herzustellen sein und gleichzeitig die definierten Anforderungen an die Durchführung der Messungen erfüllen.

Dazu wurden verschiedene Möglichkeiten zur mechanischen Umsetzung betrachtet. Die Überlegungen wurden schrittweise weiterentwickelt und hinsichtlich Aufbaus, Stabilität und praktischer Umsetzbarkeit beurteilt. Auf Grundlage dieser Überlegungen entstand schliesslich die definitive Konstruktion des Testaufbaus. Diese diente als Basis für die spätere mechanische Fertigung und den Zusammenbau des Testaufbaus.

Die erarbeiteten Skizzen wurden anschliessend mit einem AVOR-Mitarbeiter der Firma EMCH Aufzüge AG besprochen und auf ihre Umsetzbarkeit geprüft. Auf Grundlage dieser Besprechung und der vorhandenen Skizzen erstellte der Mitarbeiter die erforderlichen CAD-Pläne für die Fertigung. Anschliessend konnte der Testaufbau zur Produktion freigegeben werden.



17 Skizze Testaufbau

Weitere Massskizzen sowie die CAD Zeichnungen sind im Anhang aufgeführt.

Der Testaufbau wird auf einer 5mm starken Stahlgrundplatte aufgebaut, auf welcher die einzelnen Konstruktionselemente verschweisst werden. Auf der linken und rechten Seite werden ebenfalls 5mm starke Stahlbleche entsprechend abgekantet und mit der Grundplatte verschweisst. Durch diese Bauweise wird eine hohe mechanische Stabilität der Konstruktion erreicht.

Auf den seitlichen Blechen werden die Flacheisen zur Aufnahme der Messsensoren positioniert. Zusätzlich werden auf der Grundplatte, vertikal ausgerichtet zu den oberen Flacheisen, zwei weitere Flacheisen stehend eingeschweisst. Dazwischen soll eine Zugkraft von 100kg ausgeübt werden können, damit eine Verformung des oberen Flacheisens entsteht und somit ein Messwert generiert wird. Durch die stehende Anordnung des unteren Flacheisens wird gegenüber dem oberen Flacheisen eine viele höhere Stabilität erreicht.

Da die gesamte Grundkonstruktion aus 5mm starkem Stahlblech beziehungsweise Flachstahl gefertigt wird, lässt sie sich mit einfachen mechanischen Fertigungsverfahren wie Zuschneiden, Abkanten und Schweissen herstellen. Gleichzeitig wird durch die massive Ausführung eine hohe Stabilität des Testaufbaus gewährleistet.

Um die unterschiedlichen Steifigkeiten verschiedener Liftkabinen möglichst realitätsnah nachzubilden, werden die Flacheisen zur Aufnahme der Messsensoren in unterschiedlichen Materialstärken gefertigt. Dadurch entstehen bei gleicher Zugkraft unterschiedliche Verformungen.

Zugkrafteinrichtung

Der Testaufbau soll die Möglichkeit bieten den KL66 Sensor in Gegenüberstellung eines schon vorhandenen Messsystem zu testen. Mittels Seilwaage und einem Spannelement soll auf ein Flacheisen eine definierte Zugkraft ausgeübt werden, um eine Verformung des Bauteils herzuführen. Für dieses Vorhaben wurde die Hängewaage HS-100 von Voltcraft eingesetzt. Sie hat eine Belastbarkeit von 100kg mit einer Genauigkeit von 100g, was für den Testaufbau ausreicht. Um eine Zugkraft zu erreichen, wurde ein M8 Wantenspanner eingesetzt.



18 HS-100 Hängewaage

Quelle: www.galaxus.ch



19 Wantenspanner M8

Quelle: www.hornbach.ch

2. Messsystem

Als Vergleichssystem zum KL66 wurde das Dinacell Lastmessgerät VK-3SV mit dem SV-3000 Lastmesssenor eingesetzt. Dieses System basiert ebenfalls auf dem Prinzip des Dehnmessstreifens und ändert seinen elektrischen Widerstand bei Belastungsänderung. Das VK-3SV ist ein gängiges Lastmesssystem und wird mit 230V gespiesen.



20 Beispielbild Dinacell VK-3SV Auswerteeinheit



21 Lastmesssensor SV-3000

Quelle: www.dinacell.com

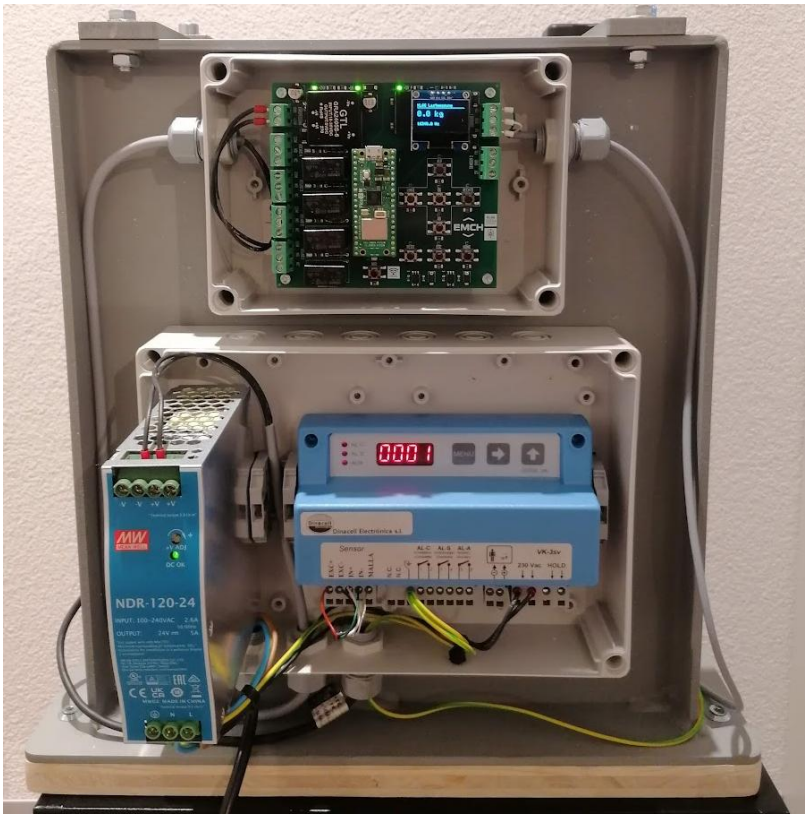
Zusammenbau

Nach der Fertigstellung des Testaufbaus durch die EMCH Aufzüge AG wurde die Metallkonstruktion mit Sprühlack in RAL 7042 grundiert und anschliessend auf einer Holzplatte befestigt. Die Holzplatte erhöht einerseits die Stabilität des gesamten Aufbaus und verhindert andererseits, dass die Metallkonstruktion Kratzer auf den Büromöbeln verursacht.

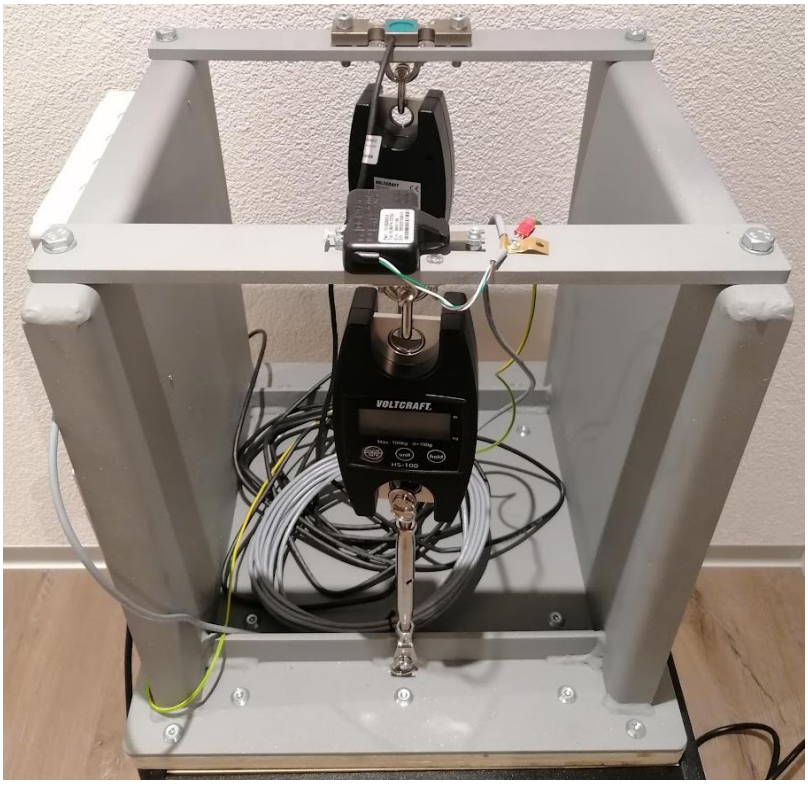
Für die Befestigung der Hängewaage an den Flacheisen wurden zusätzlich geeignete Ösen und Schäkel beschafft. Die Dinacell-Auswerteeinheit sowie das Netzteil für das neu entwickelte KL66-Auswertegerät wurden gemeinsam in einem separaten Gehäuse untergebracht und direkt an der Konstruktion befestigt. Auch das Gehäuse des Prototyps wurde am Testaufbau montiert. Dadurch entstand ein kompakter und trotz eines Gesamtgewichts von rund 26kg gut transportierbarer Versuchsaufbau.

Die elektrische Versorgung des gesamten Testaufbaus erfolgt über ein Anschlusskabel, sodass dieser mit wenigen Handgriffen in Betrieb genommen werden kann. Zusätzlich wurde ein separater PE-Leiter vorgesehen, welcher dem Anschluss des Kabelschirms des KL66-Sensors dient.

Eine detaillierte Stückliste ist im Anhang aufgeführt.



22 Testaufbau Auswertegeräte



23 Testaufbau Seilwaagen

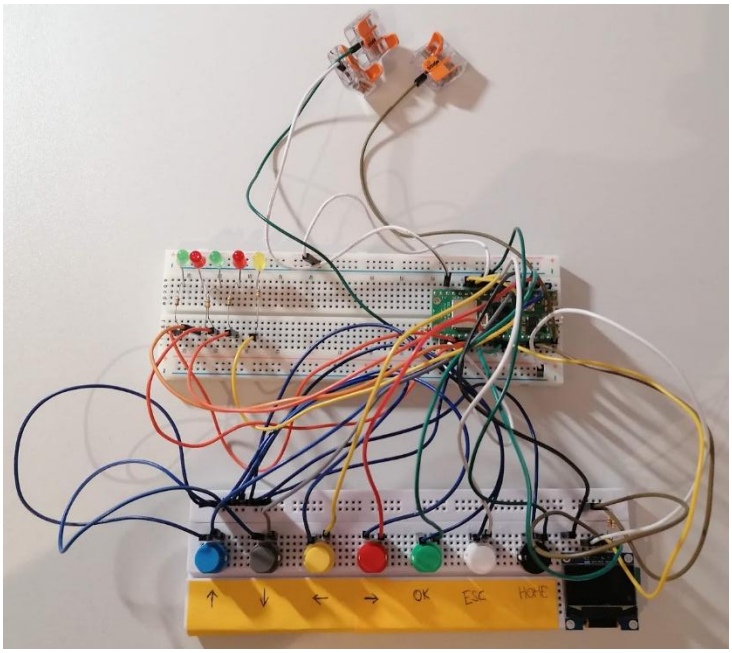
MS3 ENTWICKLUNG SOFTWARE

Entwicklungsumgebung

Für die Programmierung der Software wurde Microsoft Visual Studio eingesetzt. Innerhalb dieser Entwicklungsumgebung kann die Erweiterung Visual Micro installiert werden, welche die Erstellung und Bearbeitung von Arduino-Projekten direkt in Visual Studio ermöglicht. Dabei können die im Projekt verwendeten «.ino», «.cpp» und «.h» Dateien übersichtlich verwaltet, bearbeitet und kompiliert werden. Dadurch steht für die Entwicklung der Arduino-Software eine komfortable und strukturierte Entwicklungsumgebung zur Verfügung.

Aufgrund der für eine Softwareentwicklung dieses Umfangs erforderlichen Programmierkenntnisse wurde bei der Umsetzung zusätzlich künstliche Intelligenz als Hilfsmittel eingesetzt. Die Software wurde dabei mithilfe von ChatGPT schrittweise entwickelt. Die Aufgabe bestand insbesondere darin, die Anforderungen und gewünschten Funktionen zu definieren. Diese der KI durch gezielte Eingaben vorzugeben und die generierten Programmteile anschliessend zu überprüfen und praktisch zu testen. Der Entwickler übernimmt bei diesem Vorgehen somit eine steuernde und kontrollierende Funktion. Er gibt die Entwicklungsrichtung vor, beurteilt die Ergebnisse und veranlasst bei Bedarf entsprechende Anpassungen. Durch dieses Vorgehen konnte die Software schrittweise aufgebaut, getestet und an die Anforderungen des Lastmessgeräts angepasst werden.

Da das bestellte PCB zum Zeitpunkt der Softwareentwicklung noch nicht zur Verfügung stand, wurde für die ersten Funktionstests ein provisorischer Versuchsaufbau erstellt. Dieser bestand aus Microcontroller, den benötigten Tastern, dem Display sowie mehreren LEDs, welche die späteren Relaisausgänge symbolisierten. In Kombination mit dem Testaufbau konnten die einzelnen Softwaremodule bereits vor der Inbetriebnahme der definitiven Leiterplatte schrittweise getestet und deren Funktionen überprüft werden. Auftretende Fehler oder notwendige Anpassungen konnten somit frühzeitig erkannt und direkt in der Software korrigiert werden.



24 provisorischer Versuchsaufbau PCB

Kalibrierungsverfahren

Gemäss Datenblatt des DIGI SENS KL66 weist der Sensor eine nicht vollständig lineare Kennlinie auf. Der Hersteller gibt jedoch an, dass diese in den meisten Anwendungsfällen näherungsweise als linear betrachtet werden kann. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Softwareentwicklung zwei unterschiedliche Kalibrierverfahren untersucht und miteinander verglichen. Dazu wurden eine lineare Mehrpunktkalibrierung sowie eine quadratische Kennlinienkalibrierung entwickelt und implementiert. Anschliessend wurden beide Verfahren hinsichtlich des erforderlichen Kalibrieraufwands und der erzielbaren Messgenauigkeit untersucht und einander gegenübergestellt.

Lineare Mehrpunktkalibrierung

Bei der linearen Mehrpunktkalibrierung werden zunächst der Nullpunkt und anschliessend mehrere Referenzgewichte eingemessen. Die einzelnen Messpunkte bilden die Grundlage für eine stückweise lineare Kennlinie. Die lineare Mehrpunktkalibrierung hat den Vorteil, dass keine mathematische Gesamtkennlinie des Sensors bekannt sein muss. Jeder Referenzpunkt wird direkt durch eine Messung bestimmt. Dadurch kann die Auswerteeinheit auch unregelmässige Kennlinienverläufe zwischen den Referenzpunkten näherungsweise abbilden. Zudem wird der tatsächliche gekrümmte Verlauf zwischen zwei Referenzpunkten nur durch eine Gerade angenähert. Je grösser der Abstand zwischen den Referenzpunkten ist, desto grösser können die daraus entstehenden Interpolationsabweichungen ausfallen.

Quelle: ChatGPT

- f_1: Frequenz des ersten Referenzpunktes in Hz
- f_2: Frequenz des zweiten Referenzpunktes in Hz
- m_1: Gewicht des ersten Referenzpunktes in kg
- m_2: Gewicht des zweiten Referenzpunktes in kg
- f: aktuell gemessene Sensorfrequenz in Hz

Die Steigung des jeweiligen Abschnittes wird berechnet mit:

$$k = \frac{m_2 - m_1}{f_2 - f_1}$$

Die daraus resultierende Gewichtsberechnung lautet:

$$\boxed{m = m_1 + \frac{f - f_1}{f_2 - f_1}(m_2 - m_1)}$$

Diese Gleichung wird für jeden Abschnitt zwischen zwei Referenzpunkten separat angewendet.

25 Berechnung Mehrpunktkalibrierung

Quelle: ChatGPT

Quadratische Kennlinienkalibrierung

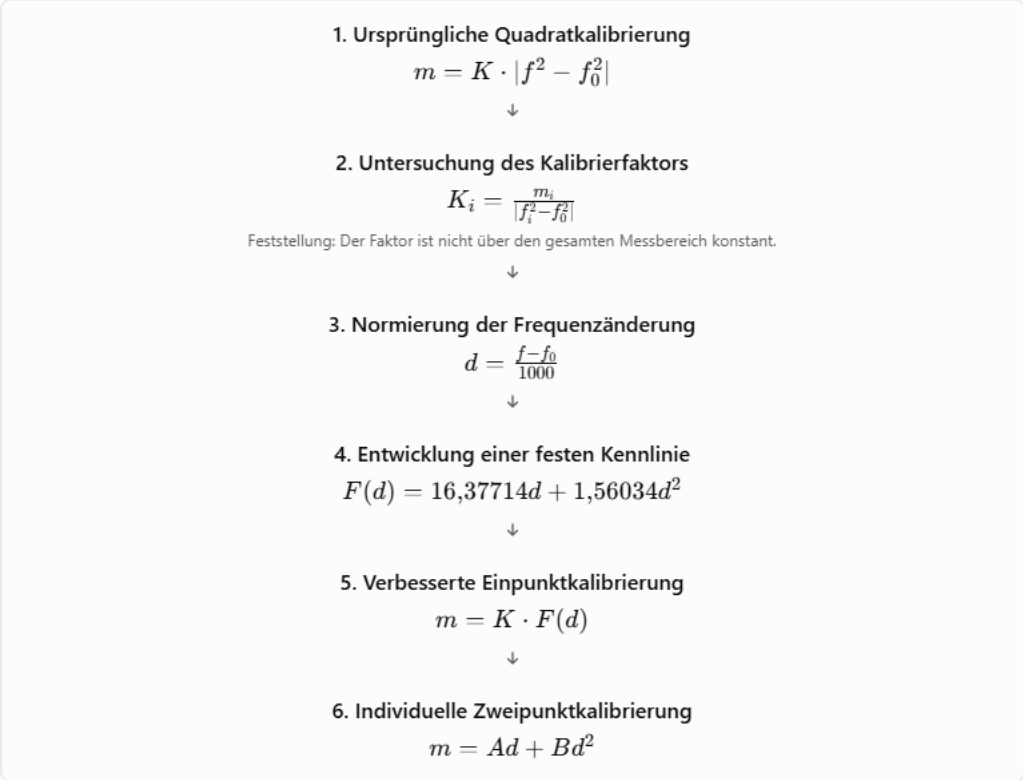
Bei diesem ersten Verfahren wurde die Gewichtsberechnung anhand der Differenz zwischen der quadrierten aktuellen Sensorfrequenz und der quadrierten Nullpunktfrequenz durchgeführt. Mithilfe eines bekannten Referenzgewichtes wurde ein entsprechender Kalibrierfaktor bestimmt. Die Erwartung war, dass sich durch diesen quadratischen Zusammenhang eine genauere Gewichtsberechnung über den gesamten Messbereich erzielen lässt. Die anschliessenden Untersuchungen zeigten jedoch, dass auch bei diesem Verfahren der Kalibrierfaktor nicht konstant blieb. Je nachdem, welches Referenzgewicht für die Kalibrierung verwendet wurde, ergaben sich unterschiedliche Kalibrierfaktoren und damit auch unterschiedliche Messabweichungen.

Um den Verlauf der Kennlinie genauer zu untersuchen, wurden vier Messreihen im Bereich von 0kg bis 100kg ausgewertet. Dabei wurde der Testaufbau schrittweise belastet und wieder entlastet. Die aufgezeichneten Sensorfrequenzen wurden anschliessend miteinander verglichen. Da die absolute Frequenz vom jeweiligen Nullpunkt abhängig ist, wurden die Frequenzwerte zunächst auf die Frequenzänderung gegenüber dem Nullpunkt bezogen und anschliessend normiert. Dadurch konnten die Messreihen auf einer gemeinsamen Grundlage untersucht werden. Anhand dieser normierten Messwerte wurde der Zusammenhang zwischen Frequenzänderung und Gewicht analysiert. Dabei zeigte sich, dass sich der Kennlinienverlauf durch eine quadratische Funktion mit einem linearen und einem quadratischen Anteil näherungsweise beschreiben lässt. Auf dieser Grundlage wurde eine neue feste Kennlinienfunktion entwickelt, deren Koeffizienten aus den experimentellen Messdaten abgeleitet wurden. Im Gegensatz zum ursprünglichen Berechnungsansatz wurde somit nicht mehr eine vorgegebene Beziehung zwischen den quadrierten Sensorfrequenzen verwendet, sondern eine empirisch ermittelte Funktion, welche den tatsächlichen Verlauf der Messwerte besser berücksichtigen sollte. Damit diese feste Kennlinienfunktion auch bei unterschiedlichen Sensoren und Montagebedingungen eingesetzt werden kann, wurde erneut ein Kalibrierfaktor eingeführt. Dieser wird anhand des Nullpunktes und eines bekannten Referenzgewichtes bestimmt und dient dazu, die feste Kennlinie an die tatsächlichen Messbedingungen anzupassen. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass lediglich ein Referenzgewicht benötigt wird, während der nichtlineare Kennlinienverlauf bereits durch die hinterlegte Funktion berücksichtigt wird.

Bei den anschliessenden Praxistests zeigte sich jedoch, dass die Messgenauigkeit weiterhin vom gewählten Referenzgewicht abhängig sein konnte. Insbesondere bei einer Kalibrierung mit einem niedrigen Referenzgewicht entstanden im oberen Messbereich teilweise grössere Abweichungen. Der Grund dafür liegt darin, dass bei der Zweipunktekalibrierung lediglich die Skalierung der Kennlinie angepasst wird, während ihre grundsätzliche Form unverändert bleibt.

Aus diesem Grund wurde das Kalibrierverfahren um einen optionalen zweiten Referenzpunkt erweitert. Bei dieser Variante wird nicht mehr die zuvor festgelegte Kennlinienfunktion verwendet. Stattdessen werden die beiden Koeffizienten der quadratischen Funktion individuell aus den gemessenen Referenzpunkten berechnet. Dadurch kann neben der Skalierung auch die Krümmung der Kennlinie an die tatsächlichen Eigenschaften des Sensors und des mechanischen Aufbaus angepasst werden.

Quelle: ChatGPT



26 Berechnungsweg quadratische Kennlinienkalibrierung

Quelle: ChatGPT

Die Entwicklung beider Kalibrierverfahren erfolgte auf Grundlage des 8mm dicken Flacheisens vom Testaufbau. Bei einer Belastung von 100kg wird damit nahezu der gesamte Frequenzbereich des DIGI SENS KL66 Sensors von ca. 16500Hz bis 21000Hz ausgeschöpft.

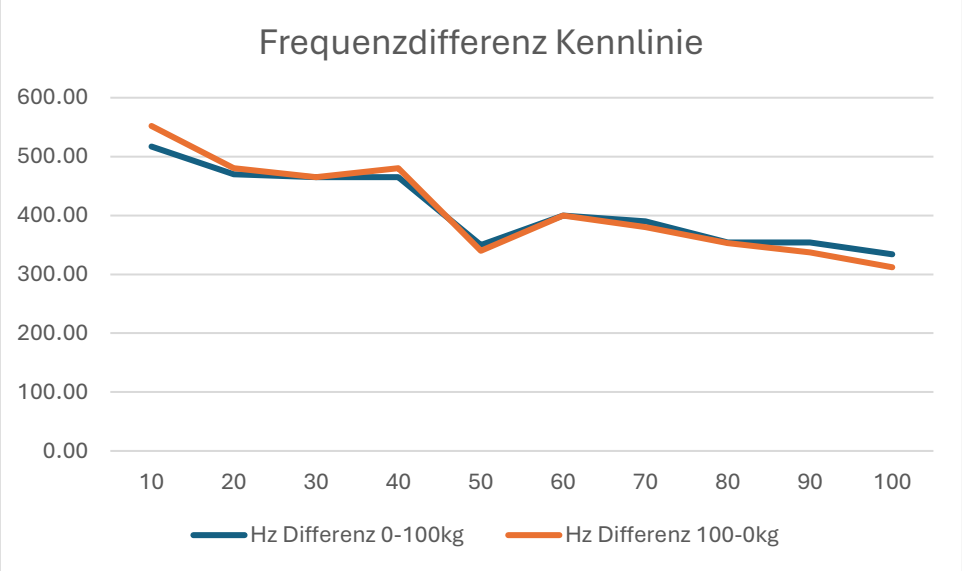
Vergleichsmessung

Bei beiden Kalibrierverfahren wurde zunächst eine Nullpunktkalibrierung durchgeführt. Anschliessend erfolgte die Kalibrierung der jeweiligen Referenzpunkte.

Bei der quadratischen Kennlinienkalibrierung wurden die Referenzpunkte bei 50kg und 100kg festgelegt. Diese Belastungen entsprechen gängigen Prüfbedingungen bei der Inbetriebnahme von Aufzugsanlagen. Häufig wird die Aufzugskabine mit 50% der Nennlast beladen, um den Gewichtsausgleich zwischen Kabine und Gegengewicht zu überprüfen. Eine Belastung mit 100% der Nennlast dient für die Überprüfung der Überlastfunktion. Durch die Wahl dieser Referenzpunkte lässt sich diese Kalibrierung somit gut in die üblichen Abläufe einer Inbetriebnahme integrieren. Bei der linearen Mehrpunktkalibrierung wurden hingegen fünf zusätzliche Referenzpunkte bei 20kg, 40kg, 60kg, 80kg und 100kg festgelegt.

Nach Abschluss der jeweiligen Kalibrierung wurden bei beiden Verfahren Vergleichsmessungen durchgeführt. Dazu wurde die Belastung zunächst in Schritten von 10kg von 0 auf 100kg erhöht und anschliessend in denselben Schritten wieder reduziert

Bei der Auswertung der Messreihen wurde festgestellt, dass die erfassten Frequenzwerte bei zunehmender und abnehmender Belastung voneinander abweichen. Diese Differenzen sind mit grosser Wahrscheinlichkeit auf einen Hystereseeffekt des Materials zurückzuführen. Besonders auffällig ist eine Unregelmässigkeit im Frequenzverlauf des Sensors im Belastungsbereich zwischen 40kg und 50kg. In diesem Bereich weicht die Frequenzänderung vom ansonsten gleichmässigen Verlauf der Sensorkennlinie ab.



27 Frequenzdifferenz Kennlinie

Bei beiden Kalibrierverfahren ist deutlich erkennbar, dass die Messabweichungen bei zunehmender Belastung wesentlich geringer ausfallen als bei abnehmender Belastung. Dies deutet auf den Hystereseeffekt des Materials hin, welcher bereits bei der Auswertung der Frequenzmessungen festgestellt wurde.

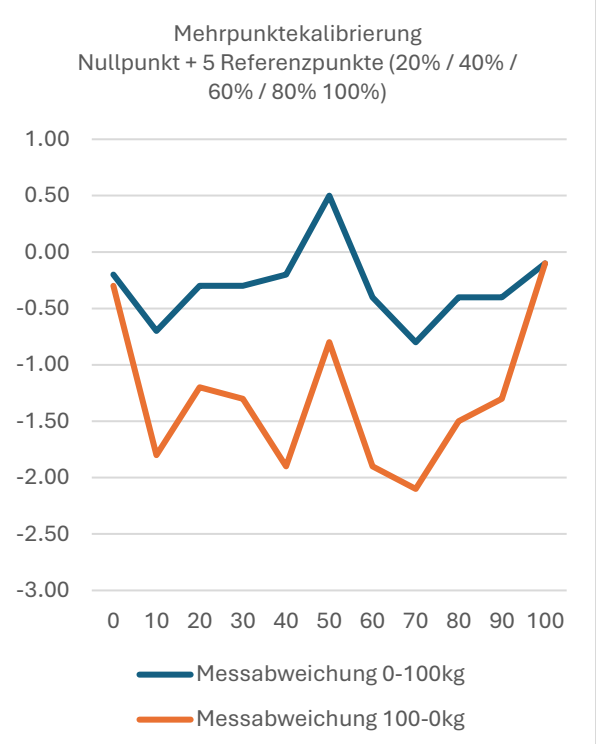
Die quadratische Kennlinienkalibrierung weist bei zunehmender Belastung über weite Bereiche eine sehr geringe Messabweichung auf. Lediglich bei 40kg ist eine auffällige Abweichung von rund 1,4kg erkennbar. Diese lässt sich auf die bereits festgestellte Unregelmässigkeit im Frequenzverlauf des Sensors zurückführen. Bei abnehmender Belastung fallen die Abweichungen deutlich grösser aus und erreichen bei 40kg einen Maximalwert von rund 3kg.

Die Mehrpunktkalibrierung zeigt bei zunehmender Belastung ebenfalls geringe Messabweichungen. Diese bewegen sich überwiegend zwischen −0,8kg und +0,5kg. Im Gegensatz zur quadratischen Kennlinienkalibrierung ist keine ausgeprägte lokale Abweichung erkennbar aufgrund der Referenzmessung bei 40kg. Bei abnehmender Belastung fallen die Messabweichungen jedoch ebenfalls deutlich höher aus und erreichen einen Maximalwert von rund 2,1kg.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die quadratische Kennlinienkalibrierung trotz der lokalen Abweichung bei 40kg eine leicht höhere durchschnittliche Messgenauigkeit erreicht. Da dieses Verfahren zudem lediglich zwei Referenzpunkte benötigt, während bei der Mehrpunktkalibrierung fünf Referenzpunkte gemessen wurde, bietet es einen wesentlichen Vorteil hinsichtlich des Kalibrierungsaufwands und der Inbetriebnahme Zeit. Aus diesen Gründen wird die quadratische Kennlinienkalibrierung für die weitere Entwicklung des Lastmessauswertegeräts bevorzugt.

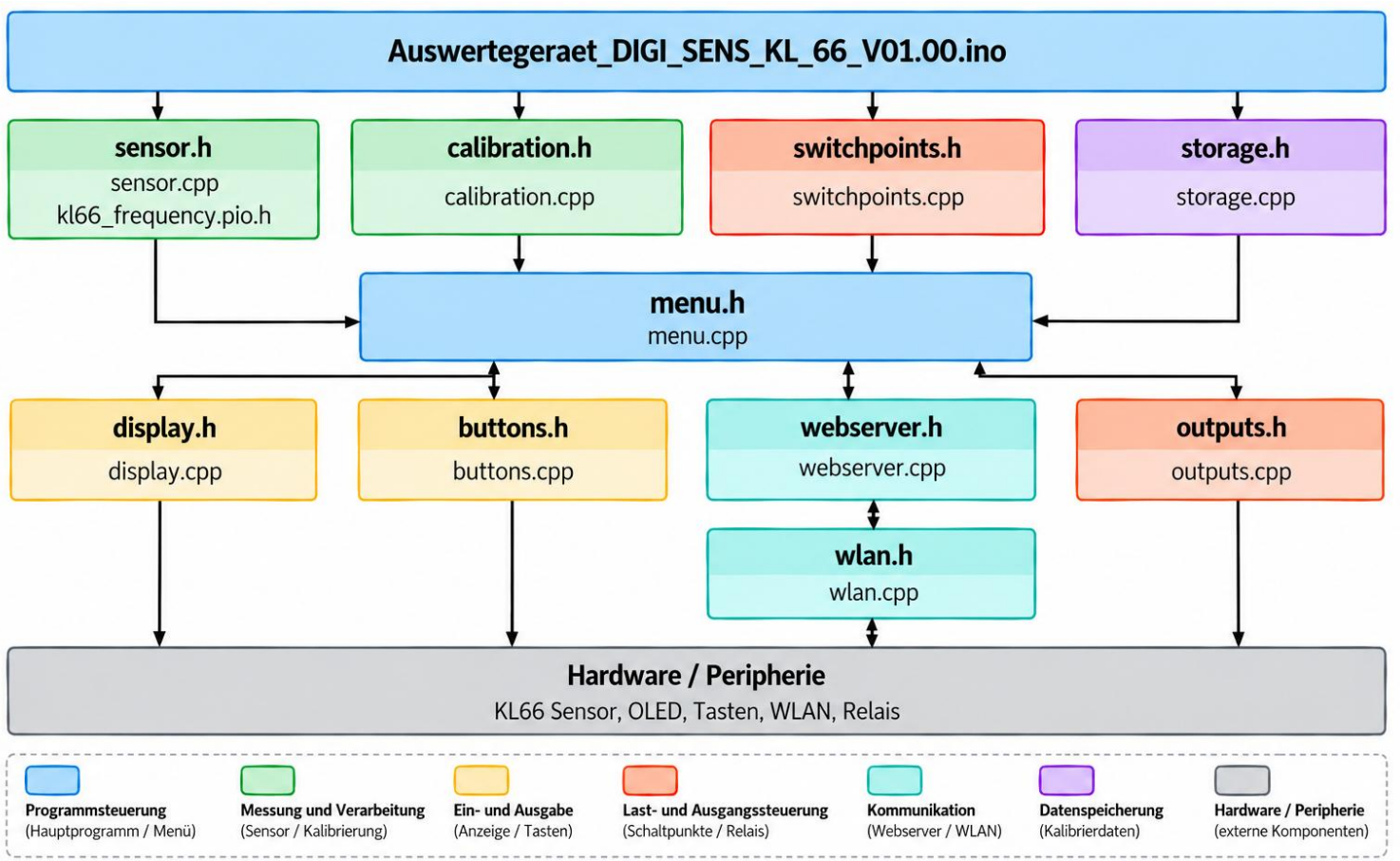


28 Messabweichung quadratische Kennlinienkalibrierung



29 Messabweichung Mehrpunktkalibrierung

Softwarestruktur



30 Übersicht Softwarestruktur

Quelle: ChatGPT

Hauptprogramm Auswertegeraet_DIGI_SENS_KL66_V01.00.ino

Das Hauptprogramm bildet die zentrale Ablaufsteuerung der Software des KL66-Lastmessgeräts. Es verbindet die einzelnen Softwaremodule miteinander und sorgt dafür, dass diese beim Systemstart initialisiert und während des Betriebs zyklisch ausgeführt werden. Um die Software übersichtlich und wartbar zu gestalten, wurden die verschiedenen Funktionen auf separate .cpp- und .h-Dateien aufgeteilt. Die Hauptdatei selbst enthält deshalb hauptsächlich die Initialisierung sowie die übergeordnete Programmsteuerung.

Beim Start des Systems wird zunächst die serielle Schnittstelle mit einer Baudrate von 115200 Baud initialisiert. Anschliessend werden nacheinander die einzelnen Softwaremodule gestartet. Dazu gehören die Frequenzmessung des Sensors, die Kalibrierung, die Verwaltung der Nutzlast und Schaltpunkte, der nichtflüchtige Speicher, die Taster, die Ausgänge, die WLAN-Funktion, der Webserver, das OLED-Display sowie die Menüführung. Nach der Initialisierung des Speichers werden vorhandene Kalibrier-, Nutzlast- und Schaltpunktdaten aus dem Speicher geladen. Dadurch stehen zuvor gespeicherte Einstellungen auch nach einem Neustart des Geräts wieder zur Verfügung.

Innerhalb der Hauptschleife werden die verschiedenen Funktionen des Geräts fortlaufend bearbeitet. Durch die modulare Aufteilung bleibt das Hauptprogramm übersichtlich, während die eigentlichen Funktionen in den jeweils dafür vorgesehenen Softwaremodulen umgesetzt sind.

Sensormodul sensor.h / sensor.cpp

Das Sensormodul ist für die Erfassung und Überwachung des Frequenzsignals zuständig. Da der Sensor die gemessene Dehnung als Frequenzsignal ausgibt, bildet dieses Modul die Grundlage für die spätere Berechnung der Last. Die Datei sensor.h stellt dabei die benötigten Funktionen und Sensorzustände für die übrigen Softwaremodule zur Verfügung, während in sensor.cpp die eigentliche Frequenzmessung und Signalüberwachung umgesetzt ist.

Für die Frequenzmessung wird die PIO-Hardware (Programmable I/O) des Raspberry Pi Pico verwendet. Das Frequenzsignal des KL66 wird über den dafür vorgesehenen GPIO eingelesen. Bei der Initialisierung wird eine freie PIO-State-Machine reserviert und das in kl66_frequency.pio.h hinterlegte PIO-Programm geladen. Die State Machine arbeitet mit dem Systemtakt des Mikrocontrollers und übernimmt die zeitkritische Erfassung des Sensorsignals unabhängig vom eigentlichen Hauptprogramm. Beim PIO übernimmt im Gegensatz zu einer ISR (Interrupt Service Routine) eine separate Hardwareeinheit die Signalerfassung. Dadurch wird die CPU entlastet.

Zur Ermittlung der Frequenz werden die vom PIO-Programm gelieferten Zählwerte aus dem Empfangspuffer ausgelesen. Um Schwankungen der einzelnen Messungen zu reduzieren, werden jeweils 64 Messwerte aufgenommen und daraus ein Mittelwert gebildet. Aus diesem durchschnittlichen Zählwert und dem aktuellen Systemtakt wird zunächst die Periodendauer und daraus anschliessend die Frequenz in Hertz berechnet. Der ermittelte Frequenzwert wird an die übrige Software übergeben.

Zusätzlich ist eine Timeout-Überwachung integriert. Wird während der Frequenzmessung für mindestens 100ms kein neuer Messwert empfangen, wird eine Frequenz von 0Hz zurückgegeben. Dadurch kann beispielsweise ein unterbrochenes oder vollständig fehlendes Sensorsignal erkannt werden und die Software bleibt nicht dauerhaft in der Frequenzmessung hängen.

Damit kurzzeitige Störungen nicht unmittelbar zu einer Fehlermeldung führen, besitzt die Sensorüberwachung zusätzlich eine Verzögerung. Ein erkannter Fehler muss mindestens zwei Sekunden ununterbrochen bestehen, bevor er übernommen wird. Kehrt die Frequenz vorher wieder in den gültigen Bereich zurück, wird der Fehler verworfen. Dadurch wird verhindert, dass einzelne kurzzeitige Signalstörungen unnötige Fehlermeldungen auslösen.

Durch die Trennung von Frequenzmessung und Signalüberwachung stellt das Sensormodul der restlichen Software sowohl den aktuellen Messwert als auch eine Information über dessen grundsätzliche Gültigkeit zur Verfügung.

Kalibrierungsmodul calibration.h / calibration.cpp

Das Kalibrierungsmodul ist für die Verwaltung der Nullpunkt- und Referenzpunktkalibrierung sowie für die anschliessende Umrechnung der gemessenen Sensorfrequenz in einen Gewichtswert zuständig. Die Software unterstützt eine quadratische Kennlinienkalibrierung mit einem oder zwei Referenzpunkten. Jeder Referenzpunkt besteht aus einem bekannten Gewicht und der dazugehörigen gemessenen Sensorfrequenz.

Die Grundlage jeder Kalibrierung bildet der Nullpunkt. Dieser entspricht der gemessenen Frequenz bei unbelastetem Lastmesssystem und wird intern als 0kg betrachtet. Zusätzlich muss mindestens ein gültiger Referenzpunkt vorhanden sein. Die Software überprüft die Kalibrierdaten auf Plausibilität und stellt sicher, dass die Gewichte und Frequenzen in aufsteigender Reihenfolge vorliegen. Ungültige Kalibrierdaten werden nicht übernommen.

Die Referenzpunkte können einzeln hinzugefügt, verändert oder gelöscht werden. Beim Hinzufügen werden diese automatisch nach ihrem Gewicht sortiert. Wird bei einer Zweipunktkalibrierung ein Referenzpunkt gelöscht, erfolgt die Berechnung automatisch anhand des verbleibenden Referenzpunktes.

Die Umrechnung der Sensorfrequenz in einen Gewichtswert erfolgt mittels einer quadratischen Kennlinienfunktion. Bei der Einpunktkalibrierung wird eine fest hinterlegte Kennlinie anhand des Referenzgewichts mit einem Kalibrierfaktor angepasst. Bei der Zweipunktkalibrierung werden die Koeffizienten der quadratischen Funktion hingegen individuell aus den beiden Referenzpunkten berechnet. Dadurch kann die Kennlinie besser an die tatsächliche Sensorcharakteristik angepasst werden.

Die berechnete Kennlinie wird anschliessend für die kontinuierliche Gewichtsermittlung verwendet. Dabei können auch Gewichte oberhalb des höchsten Referenzpunktes berechnet werden. Liegt die gemessene Frequenz auf oder unter der Nullpunktfrequenz, wird ein Gewicht von 0kg ausgegeben, wodurch negative Gewichtsanzeigen verhindert werden.

Schaltpunktmodul switchpoints.h / switchpoints.cpp

Das Schaltpunktmodul verwaltet die Nutzlast sowie die vier Schaltpunkte Leerlast, Volllast, Überlast und Schwelle 4. Die Datei switchpoints.h stellt die dafür benötigten Funktionen für die übrigen Softwaremodule bereit. Über eine Aufzählung werden die vier Schaltpunkte eindeutig definiert und können innerhalb der Software gezielt angesprochen werden.

Als Standardwert ist eine Nutzlast von 1000kg hinterlegt. Daraus werden bei der Initialisierung automatisch die Schaltpunkte für Leerlast, Volllast und Überlast berechnet. Die Leerlast entspricht 5%, die Volllast 80% und die Überlast 110% der eingestellten Nutzlast. Die zusätzliche Schwelle 4 wird unabhängig von der Nutzlast standardmässig auf 9999kg gesetzt.

Wird die Nutzlast verändert, können die drei davon abhängigen Schaltpunkte automatisch neu berechnet werden. Die Werte können bei Bedarf manuell eingestellt werden unabhängig der gespeicherten Nutzlast. Die Schwelle 4 bleibt dabei unverändert, sie ist nur manuell einstellbar.

Für jeden Schaltpunkt wird eine Hysterese von 5% des eingestellten Schaltwertes berechnet. Der Ausgang wird beim Überschreiten des jeweiligen Schaltwertes aktiviert und erst wieder deaktiviert, wenn das Gewicht unter die um 5% reduzierte Rückschaltschwelle fällt. Dadurch wird ein häufiges Ein- und Ausschalten der Relais bei geringfügigen Gewichtsschwankungen im Bereich des Schaltpunktes verhindert.

Speichermodul storage.h / storage.cpp

Das Speichermodul ist für die dauerhafte Speicherung der Kalibrier- und Einstellwerte des Lastmessgeräts zuständig. Da der Raspberry Pi Pico 2W über keinen separaten EEPROM-Speicher verfügt, werden die Daten im nichtflüchtigen Flash-Speicher abgelegt. In der Software wird hierfür die EEPROM-Bibliothek verwendet, welche eine EEPROM-ähnliche Schnittstelle für das Lesen und Schreiben der Daten zur Verfügung stellt. Dadurch bleiben Nullpunkt, Referenzpunkte, Nutzlast und Schaltpunkte auch nach dem Ausschalten oder einem Neustart des Geräts erhalten. Für die Speicherung reserviert die Software über die EEPROM-Schnittstelle einen Speicherbereich von 512 Byte.

Anzeigemodul display.h / display.cpp

Das Anzeigemodul ist für die Darstellung der Bedienoberfläche auf dem OLED-Display sowie für die Bereitstellung der entsprechenden Anzeigeinformationen für das Webinterface zuständig. Dadurch verwenden das physische Display und das Webinterface grundsätzlich dieselben Inhalte. Die Datei display.h stellt die benötigten Anzeigefunktionen für die übrigen Softwaremodule bereit.

Neben der Ausgabe auf dem OLED verwaltet das Anzeigemodul einen separaten Web-Puffer mit sechs Textzeilen. Die aktuell dargestellten Inhalte werden darin gespeichert und können vom Webserver ausgelesen werden. Über eine Versionsnummer wird erkannt, ob sich der Anzeigeinhalt verändert hat. Die Versionsnummer wird nur erhöht, wenn tatsächlich neue Anzeigeinformationen vorliegen.

Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Inhalten unterschieden. Statische Meldungen werden unmittelbar an das Webinterface weitergegeben. Bei dynamischen Anzeigen wird die Aktualisierung des Web-Puffers begrenzt. Das physische OLED wird weiterhin unmittelbar aktualisiert, während dynamische Webinhalte maximal zweimal pro Sekunde erneuert werden.

Durch die zentrale Verwaltung der Anzeigeinhalte stellt das Anzeigemodul sicher, dass OLED-Display und Webinterface auf denselben Softwareinformationen basieren. Die eigentliche Navigation und Entscheidung, welche Seite oder Meldung angezeigt werden soll, erfolgt hingegen im Menümodul.

Tastenmodul buttons.h / buttons.cpp

Das Tastenmodul ist für die Erfassung und Verarbeitung sämtlicher Benutzereingaben am Lastmessgerät sowie über das Webinterface zuständig

Um Fehlauslösungen durch das mechanische Prellen der Taster zu verhindern, wurde eine Entprellzeit von 30ms implementiert. Eine Zustandsänderung wird erst dann als gültiger Tastendruck übernommen, wenn das Eingangssignal während dieser Zeit stabil geblieben ist. Dadurch werden mehrere ungewollte Tastendrücke bei einer einzelnen Betätigung vermieden.

Für die vier Pfeiltasten wurde zusätzlich eine Langdruckfunktion implementiert. Wird eine Pfeiltaste länger als zwei Sekunden gedrückt gehalten, erzeugt die Software anschliessend alle 150ms ein weiteres Ereignis. Dies ermöglicht eine beschleunigte Änderung von Einstellwerten.

Das Tastenmodul speichert ausserdem den Zeitpunkt der letzten erkannten Benutzeraktivität. Diese Information wird von der Menüsteuerung verwendet, um nach längerer Inaktivität automatisch zur Hauptanzeige zurückzukehren.

Webservermodul webserver.h / webserver.cpp

Das Webservermodul ist für die Bereitstellung und Steuerung des Webinterfaces des Lastmessgeräts zuständig. Der Webserver arbeitet über die WLAN-Verbindung des Raspberry Pi Pico 2W und verwendet den standardmässigen HTTP-Port 80. Er wird gestartet, sobald das WLAN aktiv ist. Über verschiedene HTTP-Anfragen können die benötigten Informationen zwischen dem Lastmessgerät und dem Browser ausgetauscht werden.

Damit nicht bei jeder Browserabfrage sämtliche Daten erneut übertragen werden müssen, arbeitet die Software mit Versionsnummern. Änderungen der Displayinformationen sowie der Nutzlast, Schaltpunkte und Relaiszustände werden erkannt. Nur wenn sich die entsprechenden Daten tatsächlich verändert haben, müssen die aktualisierten Inhalte erneut an den Browser übertragen werden. Dadurch wird die WLAN-Kommunikation reduziert und die Bedienung des Webinterfaces flüssiger gehalten.

Das Webinterface wird direkt durch den Raspberry Pi Pico 2W erzeugt. Der HTML-Aufbau, die Formatierung über CSS sowie die notwendigen JavaScript-Funktionen sind im Webservermodul hinterlegt. Dadurch ist für die Bedienoberfläche kein zusätzlicher externer Webserver erforderlich. Der Browser kommuniziert direkt mit dem Lastmessgerät. Das Webservermodul bildet damit die Schnittstelle zwischen der internen Gerätesoftware und dem Webbrowser.

WLAN-Modul wlan.h / wlan.cpp

Das WLAN-Modul ist für die Bereitstellung und Verwaltung der drahtlosen Verbindung zum Webinterface zuständig. Der Raspberry Pi Pico 2W erstellt hierfür ein eigenes WLAN als Access Point. Ein Endgerät kann sich direkt mit dem vom Lastmessgerät erzeugten WLAN verbinden. Für den Access Point sind die SSID, ein Passwort und eine definierte IP-Adresse fest hinterlegt. Aus Sicherheitsgründen besitzt das WLAN eine zeitlich begrenzte Aktivierungsdauer. Nach Ablauf dieser Zeit wird die WLAN-Verbindung automatisch beendet und die WLAN Status-LED ausgeschaltet. Während der letzten fünf Minuten vor dem automatischen Abschalten wechselt die WLAN-LED von dauerhaftem Leuchten in einen Blinkbetrieb. Dadurch wird dem Benutzer signalisiert, dass die WLAN-Verbindung in Kürze automatisch beendet wird. Wird die WLAN-Laufzeit innerhalb dieses Zeitraums zurückgesetzt, beginnt erneut die vollständige Laufzeit und die LED leuchtet wieder dauerhaft.

Ausgangsmodul outputs.h / outputs.cpp

Das Ausgangsmodul ist für die Ansteuerung und Überwachung der vier Relaisausgänge sowie der WLAN Status-LED zuständig. Die Datei outputs.h stellt hierfür die benötigten Funktionen für die übrigen Softwaremodule zur Verfügung, während in outputs.cpp die eigentliche Steuerungslogik umgesetzt ist. Im normalen Betrieb erfolgt die Relaissteuerung automatisch anhand des aktuell berechneten Gewichts und der im Schaltpunktmodul hinterlegten Grenzwerte. Relais 1 ist der Leerlast, Relais 2 der Volllast, Relais 3 der Überlast und Relais 4 der frei einstellbaren Schwelle 4 zugeordnet. Zusätzlich besteht eine direkte Verknüpfung mit der Sensorüberwachung. Erkennt das Sensormodul einen Fehler oder ein fehlendes Sensorsignal, werden alle vier Relais ausgeschaltet Das Ausgangsmodul bildet somit die Schnittstelle zwischen der internen Auswertelogik und den physischen Ausgängen des Lastmessgeräts.

Menüsteuerung menu.h / menu.cpp

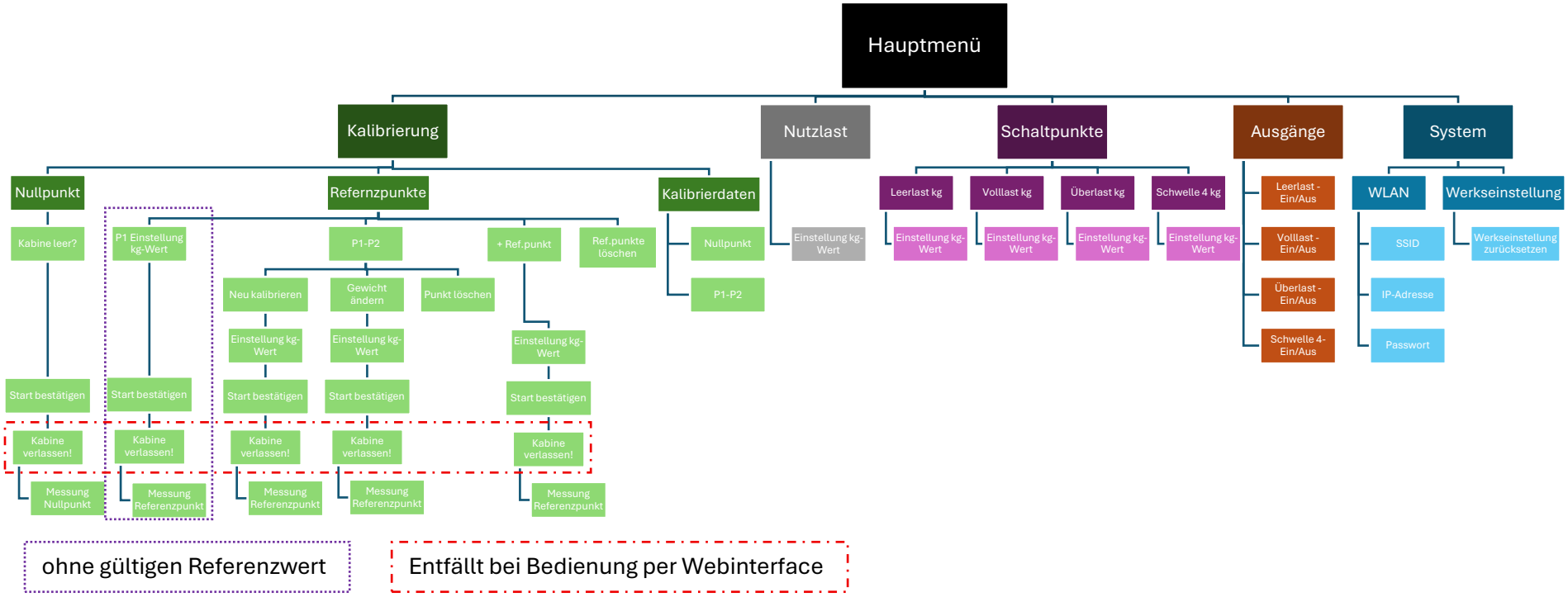
Die Menüsteueurng bildet die zentrale Bedienlogik der Auswerteeinheit. Während in der Datei menu.h die Funktionen zur Initialisierung und zyklischen Bearbeitung des Menüs definiert sind, enthält menu.cpp die eigentliche Menüstruktur und die zugehörigen Bedienabläufe. Das Modul verbindet dabei die verschiedenen Softwarebereiche wie Sensorik, Kalibrierung, Taster, Anzeige, Datenspeicherung, Schaltpunkte, Ausgänge und WLAN miteinander.

Das Menü führt den Benutzer schrittweise durch die einzelnen Arbeitsschritte und zeigt die entsprechenden Informationen und Meldungen auf dem Display an. Das Menümodul übernimmt somit die übergeordnete Benutzerführung des Lastmessgeräts. Es stellt die Verbindung zwischen den einzelnen Softwaremodulen und der Bedienoberfläche her und sorgt dafür, dass Einstellungen, Kalibrierungen und Systemfunktionen über eine einheitliche Menüstruktur ausgeführt werden können.

Quelle: ChatGPT

Aufgrund der Menge der Softwarezeilen wurde in diesem Dokument darauf verzichtet, die komplette Software im Anhang aufzuführen. Die Software kann auf Wunsch digital abgegeben werden.

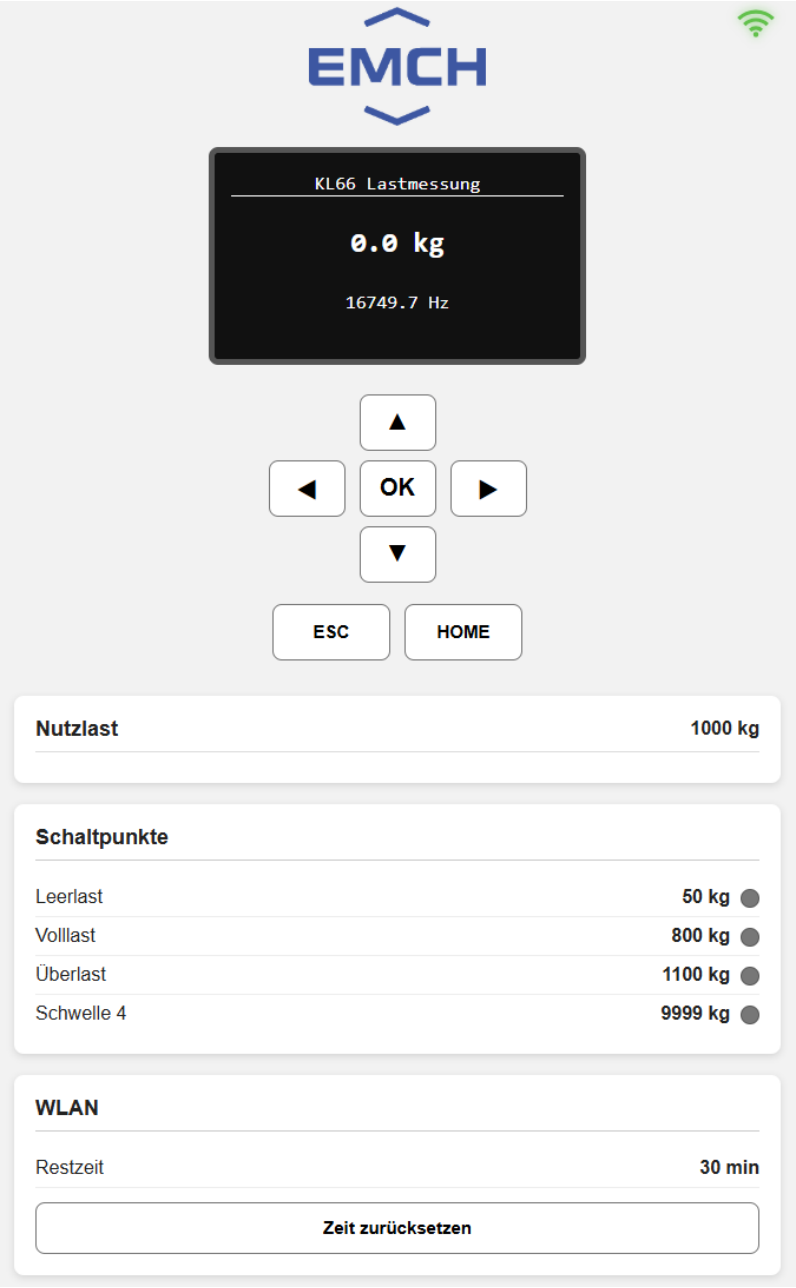
Menüstruktur



31 Übersicht Menüstruktur

Webinterface

Das Webinterface wurde optisch und funktional möglichst an die reale Hardware des Auswertegeräts angelehnt. Die Bedienung erfolgt nach demselben Prinzip wie direkt am Gerät, sodass sich der Benutzer nicht an eine zusätzliche oder abweichende Bedienoberfläche gewöhnen muss. Durch die einheitliche Gestaltung und Bedienlogik soll eine intuitive und einfache Handhabung der Auswerteeinheit sowohl direkt am Gerät als auch über das Webinterface ermöglicht werden.



32 Webinterface

Die Inbetriebnahme und Bedienung der Auswerteeinheit bzw. des Webinterface ist in der Bedienungsanleitung detailliert beschrieben.

MS4 TESTPHASE 1

Ziel und Zweck

In dieser Phase soll untersucht werden, wie sich der Sensor bei unterschiedlichen Materialstärken und den damit verbundenen Verformungen verhält. Dabei steht insbesondere die Frage im Vordergrund, ob die entwickelte Software auch bei unterschiedlichen Werkstücken zuverlässige und gleichbleibende Messergebnisse liefern kann. Darüber hinaus sollen die Erkenntnisse aus der Entwicklung und Untersuchung der Kalibrierungsverfahren nochmals vertieft betrachtet werden. Insbesondere wird untersucht, ob bei den unterschiedlichen Materialstärken ebenfalls Hystereseeffekte auftreten und ob der Frequenzverlauf des Sensors vergleichbare Unregelmässigkeiten aufweist. Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Einfluss der Materialstärke und der mechanischen Verformung auf das Messverhalten des Sensors zu beurteilen und die Zuverlässigkeit der entwickelten Software unter verschiedenen Einsatzbedingungen zu überprüfen.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Messreihen mit Flacheisen in den Materialstärken 5mm, 8mm und 10mm durchgeführt. Sämtliche Messungen erfolgten auf dem eigens dafür entwickelten Testaufbau bei Raumtemperatur, um möglichst vergleichbare Versuchsbedingungen sicherzustellen. Der KL66 Sensor wurde mit einem Anzugsmoment von 130Ncm und der Dinacell SV-3000 Sensor mit 25Nm befestigt. Die Schrauben, welche das Flacheisen auf dem Testaufbau festhalten, wurden handfest angezogen um ein verrutschen des Flacheisens zu verhindern.

Messergebnisse 5mm Flacheisen

Bei den Messungen mit dem 5mm starken Flacheisen wurde festgestellt, dass der Sensor bei 100kg bis zu 25000Hz liefert. Gemäss Datenblatt beginnt die Überlastung bei 21000Hz. Es wurde beobachtet, dass das Sensorsignal bei einer Überlastung zeitweise vollständig zusammenbricht. Da der Hersteller den zulässigen Frequenzbereich von 9000-21000Hz angibt, sollte diese Grenze im regulären Betrieb zwingend eingehalten werden. Das Werkstück, auf welchem der Sensor montiert wird, muss deshalb so dimensioniert sein, dass dessen Verformung bei Nennlast sowie bei der vorgesehenen Überlast den Sensor nicht ausserhalb seines zulässigen Messbereichs beansprucht.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erweist sich das 5mm starke Flacheisen als ungeeignet. Die Verformung des Materials ist bei höheren Belastungen zu gross, wodurch der Sensor über seinen zulässigen Frequenzbereich hinaus beansprucht wird. Aus diesem Grund werden die Messungen mit dieser Materialstärke nicht weitergeführt.

Messergebnisse 8mm / 10mm Flacheisen

Die Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Kalibrierungsverfahren durchgeführt. Bei der Zweipunktkalibrierung wurden der Nullpunkt sowie ein zusätzlicher Referenzpunkt bestimmt. Dabei wurde der Referenzpunkt schrittweise zwischen 10kg und 100kg in Schritten von jeweils 10kg gewählt. Bei der Dreipunktkalibrierung wurden neben dem Nullpunkt zwei Referenzpunkte verwendet. Der erste Referenzpunkt wurde konstant bei 100kg festgelegt, während der zweite Referenzpunkt zwischen 10kg und 90kg in Schritten von 10kg erhöht wurde. Der gemessene Frequenzbereich zwischen 0kg und 100kg betrug beim 8mm starken Flacheisen zunächst rund 4500Hz. Beim 10mm starken Flacheisen lag dieser bei ungefähr 2500Hz.

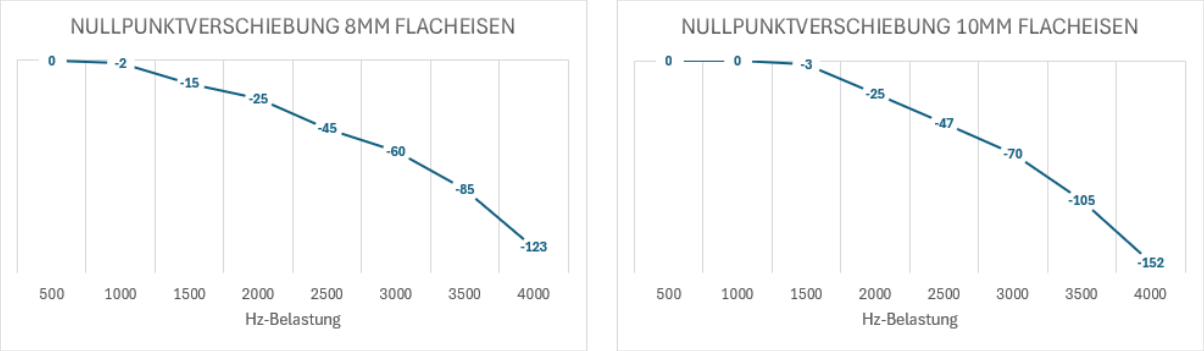
Die Messungen zeigten, dass bei sämtlichen Messreihen ebenfalls eine Hysterese zwischen der aufsteigenden und der absteigenden Belastung festgestellt werden konnte. Die daraus resultierenden Messabweichungen stimmen mit den bereits bei der Entwicklung der Kalibrierungsverfahren beobachteten Frequenzabweichungen überein. Zusätzlich war erneut eine Unregelmässigkeit im Frequenzverlauf des Sensors im Bereich zwischen ungefähr 18000Hz und 18500Hz erkennbar. Eine weitere Auffälligkeit zeigte sich bei der Überprüfung des Nullpunktes nach der Entlastung. Beim 8mm starken Flacheisen wich die tatsächliche Nullpunktfrequenz um bis zu 60Hz vom ursprünglich kalibrierten Wert ab. Beim 10mm starken Flacheisen betrug diese Abweichung sogar bis zu 80Hz, wobei die Nullpunktverschiebung mit jeder weiteren Messreihe kontinuierlich zunahm.

Dieses Verhalten ist für eine zuverlässige Lastmessung besonders problematisch. Da die mathematische Berechnung des Gewichts auf dem ursprünglich kalibrierten Nullpunkt basiert, führt jede nachträgliche Verschiebung der Nullpunktfrequenz zu einer zusätzlichen Messabweichung. Dadurch nimmt die Genauigkeit der berechneten Gewichtswerte mit zunehmender Anzahl an Messungen ab.

Aufgrund dieser Feststellungen stellte sich die Frage, wodurch die beobachteten Abweichungen verursacht werden. Eine mögliche Ursache wurde zunächst in der mechanischen Befestigung der Flacheisen vermutet. Diese waren auf dem Testaufbau lediglich mit handfest angezogenen Schrauben befestigt. Um den Einfluss der Befestigung zu untersuchen, wurden die Schrauben anschliessend fest angezogen und ein Teil der Messungen wiederholt. Die Ergebnisse waren überraschend. Die zuvor festgestellte Unregelmässigkeit im Frequenzverlauf war nach dem festen Anziehen der Schrauben nicht mehr erkennbar. Allerdings trat bereits nach kurzer Zeit erneut eine Verschiebung der Nullpunktfrequenz auf.

Um die Ursache dieser Nullpunktverschiebung genauer zu untersuchen, wurde anschliessend überprüft, ab welcher Belastung eine bleibende Veränderung des Nullpunktes auftritt. Dazu wurden beide Flacheisen gezielt belastet, sodass definierte Frequenzänderungen entstanden. Die Belastung wurde schrittweise erhöht, wobei die Frequenzänderung jeweils um 500Hz vergrössert wurde. Die Untersuchungen wurden bis nahe an die obere Grenze des zulässigen Frequenzbereichs durchgeführt. Dabei zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Höhe der Frequenzänderung und der anschliessenden Nullpunktverschiebung. Je grösser die Frequenzänderung während der Belastung ausfiel, desto stärker verschob sich der Nullpunkt nach der Entlastung. Bereits ab einer Frequenzänderung von ungefähr 1000-1500Hz konnte eine bleibende Nullpunktverschiebung festgestellt werden.

Diese Beobachtung stimmt näherungsweise mit dem im Herstellerdatenblatt angegebenen nominalen Signalbereich überein. Bei einer Ausgangsfrequenz von ungefähr 16500Hz entspricht dies einem Frequenzbereich von rund 12000-18000Hz. Eine Untersuchung des Sensorverhaltens bei einer Frequenzänderung in die entgegengesetzte Richtung war aufgrund der konstruktiven Eigenschaften des Testaufbaus nicht möglich.



33 Nullpunktverschiebung KL66 8mm/10mm Flacheisen

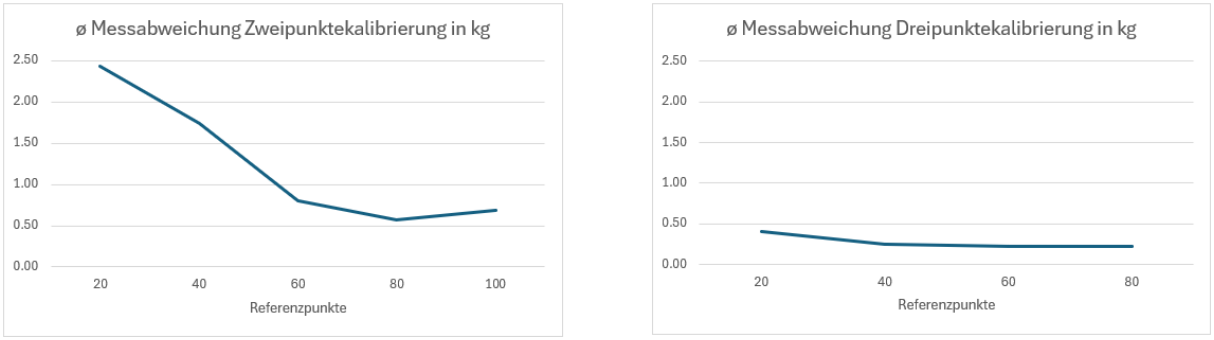
Durch das feste Anziehen der Befestigungsschrauben veränderte sich auch der Frequenzbereich der beiden Flacheisen bei gleicher Belastung deutlich. Beim 8mm starken Flacheisen reduzierte sich die Frequenzänderung zwischen 0kg und 100kg von ursprünglich rund 4500Hz auf ungefähr 2500Hz. Beim 10mm starken Flacheisen verringerte sich diese von rund 2500Hz auf 1700Hz. Diese Ergebnisse verdeutlichen, wie stark die mechanischen Einspannbedingungen das Verformungsverhalten der Flacheisen und damit das Ausgangssignal des Sensors beeinflussen.

Da beim 8mm starken Flacheisen weiterhin eine zunehmende Nullpunktverschiebung auftrat, wurde entschieden, die weiteren Messungen mit dieser Materialstärke nicht fortzuführen. Eine zuverlässige Beurteilung der Messgenauigkeit wäre unter diesen Bedingungen nur eingeschränkt möglich gewesen, da sich die Kalibriergrundlage mit jeder weiteren Messreihe veränderte. Die weiteren Messungen wurden deshalb mit dem 10mm starken Flacheisen durchgeführt. Aufgrund der zuvor gewonnenen Erkenntnisse wurde auch bei dieser Materialstärke mit einer geringen, aber kontinuierlichen Nullpunktverschiebung gerechnet, da die Frequenzänderung bei rund 1700Hz liegt. Entgegen dieser Erwartung konnte jedoch bei den anschliessenden Messreihen keine weitere Nullpunktverschiebung festgestellt werden. Dieses Ergebnis widersprach zunächst den Beobachtungen aus den vorherigen Untersuchungen.

Um dieses Verhalten zu erklären, wurde der Einfluss einer vorherigen Überlastung des Sensors genauer untersucht. Dazu wurde der Sensor zunächst mehrfach über seinen vorgesehenen Messbereich hinaus belastet und anschliessend wieder geringeren Belastungen ausgesetzt. Dabei zeigte sich, dass sich der Sensor durch wiederholte hohe Belastungen offenbar dauerhaft verändert. Nach einer solchen Beanspruchung reagierte der Sensor bei anschliessenden geringeren Belastungen mit einer deutlich kleineren oder sogar vollständig ausbleibenden Nullpunktverschiebung. Dieses Verhalten deutet auf eine bleibende mechanische Veränderung beziehungsweise Dehnung des Sensorelements hin. Damit liess sich auch das zuvor unerwartete Verhalten des 10mm starken Flacheisens erklären. Der Sensor war während der Untersuchung der Nullpunktverschiebung bereits mehrfach höheren Belastungen ausgesetzt worden.

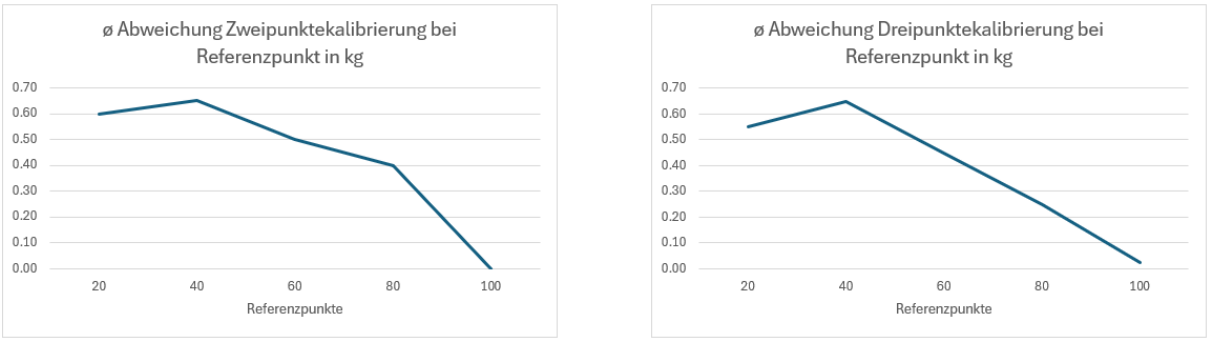
Da diese Untersuchungen unter denselben mechanischen Einspannbedingungen durchgeführt wurden, trat bei den anschliessenden Messreihen mit geringeren Belastungen keine zusätzliche Nullpunktverschiebung mehr auf. Beim 8mm starken Flacheisen konnte dieser Effekt anschliessend ebenfalls beobachtet werden. Allerdings reichte eine vorherige hohe Beanspruchung nicht aus, um die Nullpunktverschiebung vollständig zu verhindern, da die Frequenz um rund 2400Hz verändert wird bei Vollbelastung. Die Abweichungen fielen jedoch deutlich geringer aus als bei den ursprünglichen Messungen. Aus den Versuchen lässt sich ableiten, dass sich der Frequenzbereich durch eine vorgängige höhere Belastung um ungefähr 200-300Hz erweitern lässt. Für den praktischen Einsatz stellt dieses Vorgehen jedoch keine zweckmässige Lösung dar. Einerseits wird der Sensor dabei gezielt über seinen vorgesehenen Messbereich hinaus beansprucht, andererseits würde dies zusätzliche Arbeitsschritte und gegebenenfalls eine erneute Kalibrierung erfordern.

Bei der Zweipunktkalibrierung wurden die geringsten Messabweichungen erzielt, wenn der Referenzpunkt bei 80% der Nennlast gewählt wurde. Dabei wurde eine durchschnittliche Abweichung von 0.57kg erreicht. Bei der Dreipunktkalibrierung ergaben sich die besten Messergebnisse, wenn ein Referenzpunkt bei 100% der Nennlast und der zweite Referenzpunkt bei 40-80% der Nennlast festgelegt wurde. Somit wurde eine durchschnittliche Abweichung von lediglich 0.25kg erreicht.



34 Vergleich durchschnittliche Messabweichung KL66 MS4

Zudem wurde geprüft, wie gross die Abweichung auf den jeweils kalibrierten Referenzpunkten ausfiel. Bei der Zweipunktekalibrierung wurde eine durchschnittliche Abweichung auf dem Referenzpunkt von 0.43kg erreicht. Leicht besser hat die Dreipunktekalibrierung mit 0.39kg abgeschnitten. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Kurven sehr ähnlich sind zwischen den unterschiedlichen Kalibriermethoden. Beide resultieren mit den besten Ergebnissen bei 100% Referenzlast. Dies ist auf die Hysterese zwischen Aufwärts- und Abwärtsmessung zurückzuführen, welche bei Volllast nicht vorhanden ist.

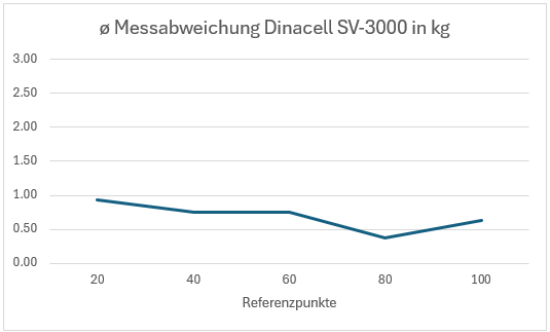


35 Vergleich durchschnittliche Messabweichung bei Referenzpunkt KL66 MS4

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen wurde auch die Reproduzierbarkeit der Messwerte analysiert. Als Grundlage dienten die Messdaten des 10mm starken Flacheisens, bei welchen keine bleibende Nullpunktverschiebung mehr festgestellt werden konnte. Die Auswertung zeigte, dass die gemessene Frequenz bei gleicher Belastung eine durchschnittliche relative Abweichung von ungefähr +/- 0,35% aufwies. Dies deutet auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messwerte unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen hin.

Dinacell Messsystem

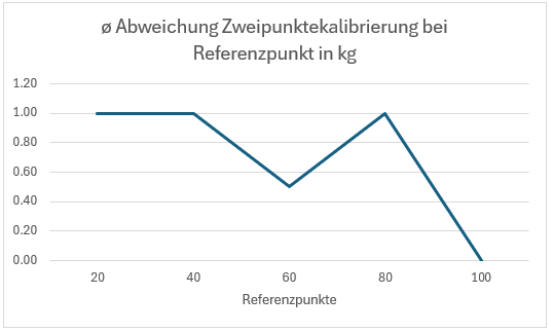
In einem weiteren Schritt wurde der KL66 mit dem Dinacell-Messsystem verglichen. Sämtliche Vergleichsmessungen wurden ebenfalls mit dem 10mm starken Flacheisen durchgeführt, um möglichst identische mechanische Bedingungen sicherzustellen. Die Messergebnisse des Dinacell-Systems zeigten ein ähnliches Verhalten wie diejenigen des KL66. Da das Dinacell-Messsystem ausschliesslich mit einer Zweipunktkalibrierung arbeitet, wurden für den direkten Vergleich die entsprechenden Messreihen des KL66 herangezogen. Auch beim Dinacell-System zeigte sich, dass die geringsten durchschnittlichen Messabweichungen von 0.38kg erzielt wurden, wenn der Referenzpunkt bei ungefähr 80% der Nennlast gewählt wurde.



36 Messabweichung Dinacell SV-3000 MS4

Damit bestätigen die Vergleichsmessungen die bereits beim KL66 gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der optimalen Positionierung des Referenzpunktes. Ebenfalls konnte eine Hysterese zwischen Aufwärts- und Abwärtsmessung festgestellt werden.

Die Genauigkeit auf dem Referenzpunkt fällt mit 0.7kg ebenfalls leicht schlechter aus. Zudem sind die besten Werte genau gleich wie beim KL66 Sensor bei 100% Nennlastkalibrierung erzielt worden.



37 Vergleich durchschnittliche Messabweichung bei Referenzpunkt Dinacell MS4

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit ergab beim Dinacell-System eine durchschnittliche relative Abweichung von ungefähr +/- 0,6%. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Dinacell-Auswertegerät die gemessenen Gewichtswerte ausschliesslich in ganzen Kilogramm anzeigt, während der entwickelte KL66-Prototyp eine Auflösung von 0,1kg ermöglicht. Die geringere Anzeigeauflösung des Dinacell-Systems kann die Auswertung kleiner Messabweichungen zusätzlich beeinflussen. Unter den untersuchten Bedingungen zeigte der KL66-Prototyp somit eine etwas bessere Reproduzierbarkeit als das Dinacell-Messsystem mit dem SV-3000 Sensor. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit dem entwickelten Prototyp eine mindestens vergleichbare, teilweise sogar höhere Messgenauigkeit erreicht werden kann.

In einem weiteren Versuch wurden sämtliche vorhandenen Flacheisen übereinandergelegt und miteinander verschraubt. Ziel dieser Anordnung war es, eine deutlich höhere mechanische Steifigkeit zu erreichen und dadurch die Verformung bei Belastung wesentlich zu reduzieren. Basierend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen wurde erwartet, dass die Frequenzänderung bei einer Belastung von 0-100kg weniger als 1000Hz betragen würde. Damit sollte die Belastung unterhalb des zuvor festgestellten kritischen Bereichs liegen, ab welchem eine bleibende Nullpunktverschiebung auftreten kann. Entgegen den Erwartungen konnten mit dieser Anordnung jedoch keine plausiblen und reproduzierbaren Messergebnisse erzielt werden. Die Messwerte wiesen teilweise erhebliche Unterschiede auf, obwohl die Belastungsbedingungen unverändert blieben. Da die einzelnen Werkstücke lediglich miteinander verschraubt und weder verschweisst noch als massives Stahlteil ausgeführt waren, konnten zwischen den einzelnen Materialschichten unterschiedliche mechanische Spannungen entstehen. Diese Einflüsse führten dazu, dass die Verformung nicht gleichmässig auf den Sensor übertragen wurde und dadurch stark unterschiedliche Messresultate entstanden. Dieser Versuch wurde ebenfalls mit dem Dinacell-Messystem untersucht und es konnten die gleichen Abweichungen festgestellt werden. Somit lässt sich diese Erklärung bestätigen.

Die Untersuchung verdeutlicht, dass nicht allein die Materialstärke beziehungsweise die Steifigkeit des Werkstücks für eine zuverlässige Messung entscheidend ist. Ebenso wichtig sind dessen mechanischer Aufbau, die Befestigung und eine möglichst gleichmässige und reproduzierbare Verformung. Die Messdaten des 10mm Flacheisen und des Dinacell Vergleichssystem sind im Anhang aufgeführt.

MS5 TESTPHASE 2

Ziel und Zweck

In der abschliessenden Projektphase soll das Zusammenspiel zwischen Hardware und Software unter realen Betriebsbedingungen an einer Aufzugsanlage überprüft werden. Dabei steht insbesondere die Frage im Vordergrund, wie einfach sich das entwickelte System in eine Aufzugsanlage integrieren lässt. Zudem soll untersucht werden, ob die unter realen Bedingungen ermittelten Messwerte mit den Ergebnissen aus der ersten Testphase vergleichbar sind und ob die entwickelte Auswerteeinheit auch im praktischen Einsatz zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die Tests sollen mit einer Belastung von 0-1000kg durchgeführt werden.

Darüber hinaus sollen mögliche Schwachstellen und Verbesserungspotenziale erkannt werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Beurteilung des Prototyps und sollen wichtige Anhaltspunkte für eine mögliche Weiterentwicklung des Systems liefern.

Testanlage

Die von der Firma EMCH zur Verfügung gestellte In-House Testanlage ist in einem Testschacht mit drei Etagen über eine Förderhöhe von rund 7.6m eingebaut. In diesem Testschacht können verschiedenen Aufzugsmodelle eingebaut werden. Zurzeit ist dort eine seilmechanische Rucksackanlage mit 1000kg Nutzlast und 2:1 Aufhängung eingebaut.

Das Rucksacksystem ist eine spezielle Bauweise eines Aufzugs, bei welcher die Aufzugskabine einseitig an einem tragenden Kabinenrahmen befestigt ist. Im Gegensatz zu herkömmlichen Aufzugssystemen, bei welchen die Führungsschienen auf beiden Seiten der Kabine angeordnet sind, befinden sich diese beim Rucksacksystem auf derselben Seite. Der Kabinenrahmen trägt die gesamte Kabine und führt diese über Führungsschuhe entlang der Führungsschienen. Aufgrund dieser einseitigen Anordnung entsteht eine Konstruktion, die einem Rucksack ähnelt, woraus sich die Bezeichnung Rucksacksystem ableitet.

Bei einer 2:1-Aufhängung erfolgt die Kraftübertragung über Tragmittel, welche über Umlenkrollen am Kabinenrahmen geführt werden. Durch diese Anordnung wird die Kabine von jeweils zwei tragenden Seilabschnitten gehalten. Das Übersetzungsverhältnis von 2:1 bedeutet, dass sich die Tragmittel um zwei Meter bewegen müssen, damit die Kabine einen Meter zurücklegt.

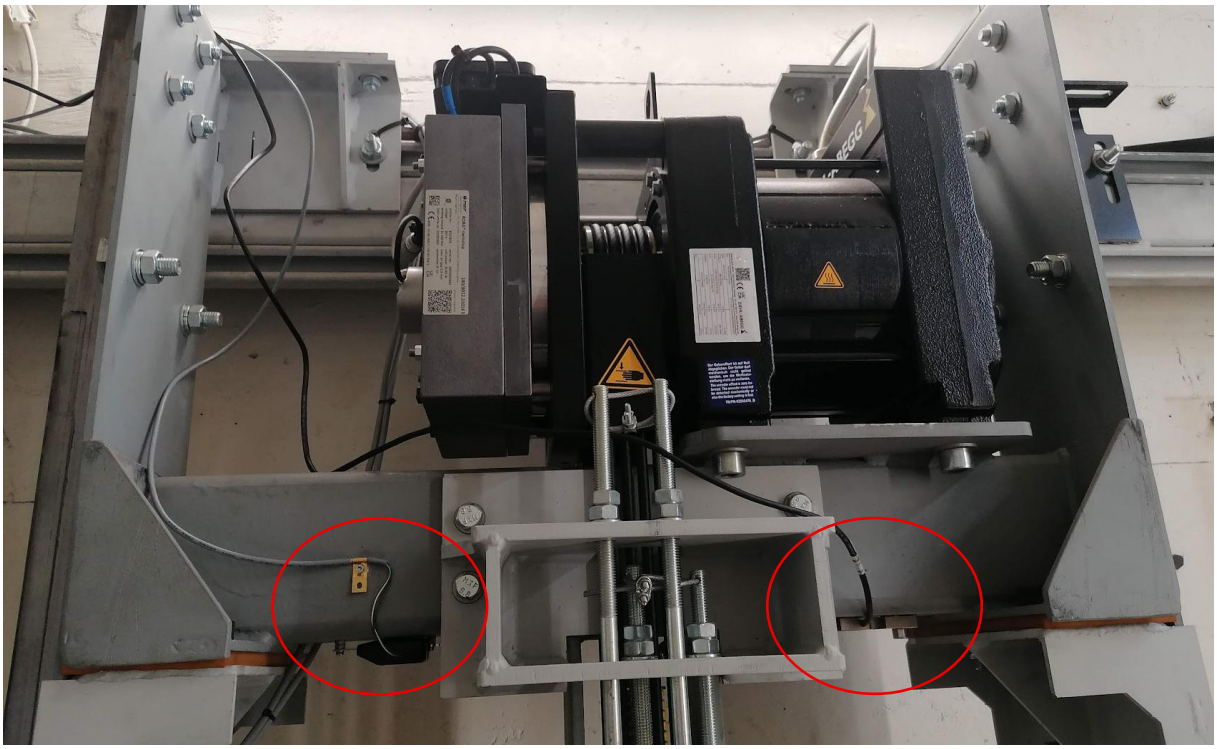
Quelle: ChatGPT

Messpunkt Motorenträger

Um eine zuverlässige Messung der Kabinenlast mit nur einem Sensor zu ermöglichen, muss eine geeignete Montageposition gewählt werden, an welcher die mechanische Beanspruchung möglichst unabhängig von der Lastverteilung innerhalb der Kabine ist. Dadurch soll sichergestellt werden, dass bei gleicher Gesamtbelastung stets vergleichbare Messwerte erfasst werden, unabhängig davon, an welcher Position sich die Last in der Kabine befindet.

Aus diesem Grund wurden zunächst der Motorenträger sowie die Seilendpunkte als mögliche Montagepositionen in Betracht gezogen. Beide Bauteile nehmen die auftretenden Lastkräfte auf und erschienen daher grundsätzlich für eine Lastmessung geeignet. Für die ersten Versuche wurden sowohl der DIGI SENS KL66 als auch der Dinacell SV-3000 am Motorenträger befestigt und mit den jeweiligen Auswertegeräten verbunden. Bereits bei den ersten Belastungsversuchen zeigte sich jedoch, dass diese Montageposition für die Lastmessung ungeeignet ist. Aufgrund der sehr massiven Bauweise des Motorenträgers konnte bei einer Veränderung der Kabinenlast keine Verformung festgestellt werden. Dadurch war es nicht möglich, eine auswertbare Änderung des Sensorsignals zu erfassen.

In der Folge wurde nach einer alternativen Montageposition gesucht. Die Seilendpunkte wurden ebenfalls genauer betrachtet. Aufgrund ihrer ebenfalls massiven Konstruktion und der damit verbundenen geringen zu erwartenden Verformung jedoch als wenig geeignet eingestuft. Zusätzlich erschwerte die schlechte Zugänglichkeit dieser Bauteile eine fachgerechte und einfache Montage der Sensoren. Somit erwiesen sich beide ursprünglich vorgesehenen Montagepositionen als ungeeignet, weshalb die Suche nach einem besser geeigneten Messpunkt fortgesetzt werden musste.



38 Motorenträger Testanlage

Messpunkt Kabinenboden

Nach den erfolglosen Messversuchen am Motorenträger zeigte sich, dass die gewählte Testanlage grundsätzlich ungeeignet für den Einsatz eines einzelnen Lastmesssensors ist. Um die Testphase dennoch fortsetzen und den entwickelten Prototyp unter realen Bedingungen überprüfen zu können, wurde nach einer alternativen Montageposition gesucht. Schliesslich wurde der Sensor an einer Quertraverse des Kabinenbodenrahmens befestigt.

Diese Montageposition ist für den praktischen Einsatz einer Lastmessung grundsätzlich ungeeignet, da die Verformung der Quertraverse stark von der Position der Last innerhalb der Kabine abhängig ist. Um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, muss die Prüflast deshalb bei jeder Messung exakt an derselben Stelle positioniert werden. Da diese Voraussetzung im normalen Aufzugsbetrieb nicht gewährleistet werden kann, eignet sich diese Anordnung nicht für eine dauerhaft zuverlässige Lastmessung. Für die Überprüfung des Prototyps unter kontrollierten Bedingungen wurde diese Montageposition dennoch als zweckmässige Lösung gewählt.



39 Bodenrahmen Testanlage

Aufgrund dieser Gegebenheiten mussten die ursprünglich vorgesehenen Rahmenbedingungen der zweiten Testphase angepasst werden. Anstelle der geplanten 20kg schweren Prüfsteine und Kisten wurden Prüfplatten mit einem Gewicht von jeweils 43kg verwendet. Dadurch konnte eine grössere Gesamtlast auf einer möglichst kleinen und gleichbleibenden Fläche innerhalb der Kabine konzentriert werden. Um sicherzustellen, dass die Prüfplatten bei sämtlichen Messungen an derselben Position platziert werden, wurde die Lage des Sensors auf den Kabinenboden übertragen und die entsprechende Position der Prüfplatten eindeutig gekennzeichnet.

Da die Prüfplatten für jede Messung nun von Hand in die Kabine transportiert und präzise aufeinandergestapelt werden mussten, wurde die ursprünglich vorgesehene Prüflast von 1000kg auf 430kg reduziert. Dies entspricht einer Belastung mit zehn Prüfplatten zu jeweils 43kg. Zusätzlich wurde auf den ursprünglich geplanten direkten Vergleich mit dem zweiten Lastmesssystem verzichtet.



40 Markierung Position Prüfplatten



41 Prüfplatten 10Stück à 43kg

Messergebnisse

Die Messreihen wurden mit denselben Kalibrierungsverfahren durchgeführt, welche bereits in der ersten Testphase untersucht worden waren. Bei der Zweipunktkalibrierung wurden der Nullpunkt sowie ein zusätzlicher Referenzpunkt bei 20%, 40%, 60%, 80% und 100% der maximalen Prüflast kalibriert. Anschliessend erfolgte die Dreipunktkalibrierung mit dem Nullpunkt und zwei zusätzlichen Referenzpunkten. Dabei wurde ein Referenzpunkt konstant bei 100% der Prüflast festgelegt, während der zweite Referenzpunkt zwischen 20%, 40%, 60% und 80% variiert wurde. Sämtliche Messungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 18°C durchgeführt. Aufgrund des hohen körperlichen Aufwands beim Transportieren und Stapeln der Prüfplatten wurde darauf verzichtet, die Messreihen sowohl in aufsteigender als auch in absteigender Belastungsrichtung durchzuführen. Jeder Gewichtspunkt wurde daher lediglich einmal gemessen. Die Kalibrierungen sowie die Erfassung der Messresultate erfolgten jeweils bei stillstehender Kabine in der mittleren Etage. Die Prüfplatten wurden hingegen in der obersten Etage in die Kabine geladen. Anschliessend wurde der Aufzug eine Etage nach unten gefahren, wo die entsprechenden Messwerte abgelesen und dokumentiert wurden. Dadurch wurde die Aufzugsanlage zwischen den einzelnen Messungen regelmässig bewegt.

Zu Beginn wurde untersucht, ob sich die Ausgangsfrequenz des Sensors in Abhängigkeit von der Position der Aufzugskabine verändert. Während der Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen konnten geringfügige Frequenzänderungen festgestellt werden. Sobald die Kabine jedoch in der jeweiligen Etage zum Stillstand kam, kehrte die Frequenz annähernd auf ihren ursprünglichen Wert zurück. Im Stillstand waren weiterhin leichte Frequenzschwankungen von ungefähr +/-5Hz erkennbar. Vergleichbare Schwankungen wurden bereits während der ersten Testphase am eigens entwickelten Testaufbau festgestellt. Somit konnte kein wesentlicher zusätzlicher Einfluss der unterschiedlichen Etagenpositionen auf das Sensorsignal festgestellt werden.

Bei der maximalen Prüflast von 430kg wurde eine Frequenzänderung von ungefähr −285Hz gemessen. Im Gegensatz zu den Messungen der ersten Testphase wurde der Sensor bei dieser Montageposition somit in negativer Frequenzrichtung beansprucht. Aus der maximalen Prüflast und der gemessenen Frequenzänderung ergeben sich somit 1.5kg/Hz. Aufgrund der geringen Frequenzänderung über den gesamten Messbereich wirkten sich die vorhandenen Frequenzschwankungen entsprechend stark auf die angezeigten Gewichtswerte aus.

Da das Sensorsignal auch bei stillstehender Kabine um einige Hz schwankte, veränderte sich die berechnete Gewichtsanzeige fortlaufend. Dadurch war es teilweise schwierig, einen eindeutigen Messwert abzulesen. Um dennoch möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde jeweils ein mittlerer Anzeigewert ermittelt und dokumentiert.

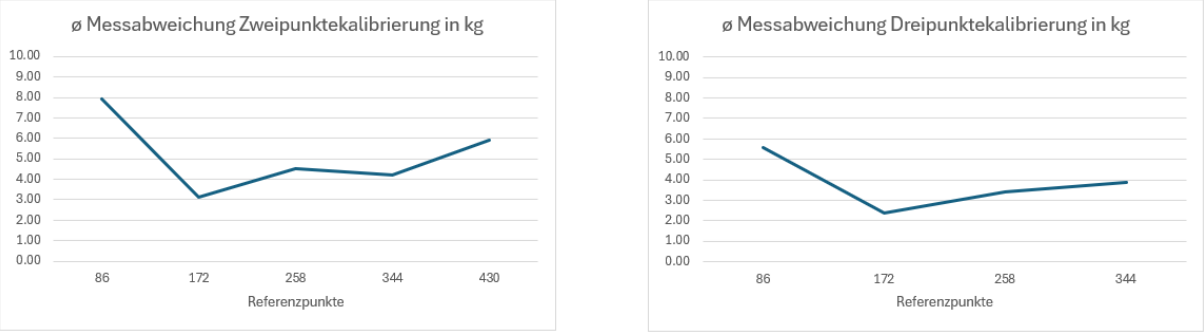
Ein weiteres Problem zeigte sich bei den Relaisschaltpunkten. Befand sich der berechnete Gewichtswert in unmittelbarer Nähe eines eingestellten Schaltpunktes, führten die Schwankungen der Gewichtsanzeige teilweise zu einem wiederholten Ein- und Ausschalten des entsprechenden Relais. Da die Abweichungen zeitweise bis zu +/-10kg betrugen, reichte die programmierte Hysterese von 5% des jeweiligen Schaltpunktes nicht in allen Fällen aus, um dieses Relaisflattern zuverlässig zu verhindern.

Während der Messreihen mit der Zweipunktkalibrierung wurde trotz des kleinen Frequenzbereichs eine Nullpunktverschiebung von insgesamt 13Hz festgestellt. Dieses Verhalten widerspricht den Erkenntnissen aus der ersten Testphase, bei welcher unter vergleichbaren Frequenzbedingungen keine weitere Nullpunktverschiebung mehr beobachtet werden konnte.

Eine Abweichung von 13Hz erscheint zunächst gering. Damit entspricht die Nullpunktverschiebung rechnerisch bereits ungefähr 4,6% des gesamten Messbereichs. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde der Nullpunkt vor Beginn der Dreipunktkalibrierung erneut kalibriert. Dadurch sollte verhindert werden, dass die ohnehin vorhandenen Messwertschwankungen durch einen verschobenen Nullpunkt zusätzlich verfälscht werden.

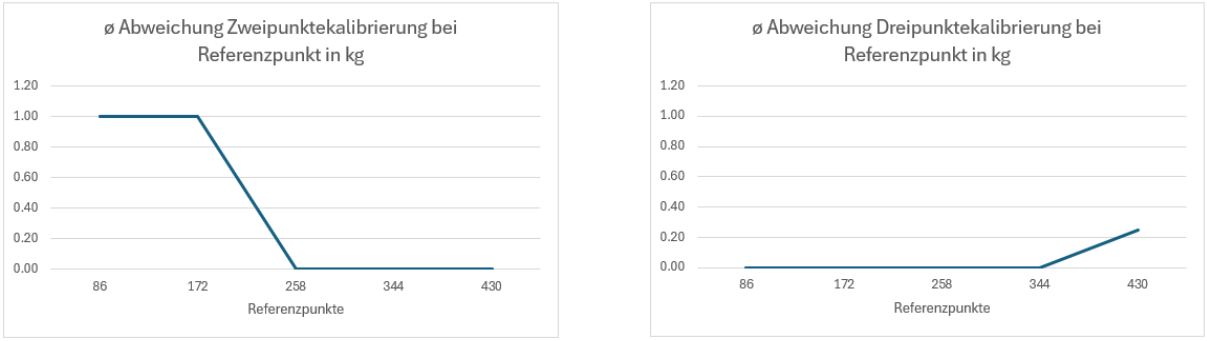
Während der anschliessenden Messreihen konnte überraschenderweise keine weitere Nullpunktverschiebung festgestellt werden. Da dieses Verhalten bereits in der ersten Testphase unter unterschiedlichen Bedingungen beobachtet worden war, lässt sich die genaue Ursache der Nullpunktverschiebung anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht abschliessend bestimmen.

Die Auswertung der Messreihen zeigte, dass bei beiden Kalibrierungsverfahren die geringsten Messabweichungen erzielt wurden, wenn ein Referenzpunkt bei 40% der maximalen Prüflast gewählt wurde. Bei der Zweipunktekalibrierung wurde so eine geringste durchschnittliche Abweichung von 3.1kg erreicht. Bei der Dreipunktekalibrierung hingegen sogar 2.4kg. Insbesondere das Ergebnis der Zweipunktkalibrierung weicht von den Erkenntnissen aus der ersten Testphase ab, bei welcher die geringsten Messabweichungen mit einem Referenzpunkt von 80% der Nennlast festgestellt wurden. Somit können die Ergebnisse aus der ersten Testphase nicht generalisiert werden.



42 Vergleich durchschnittliche Messabweichungen KL66 MS5

Wie schon in der ersten Testphase wurde auch hier die Genauigkeit der Messergebnisse auf dem Referenzpunkt ermittelt.
Dabei wurde eine Abweichung von 0.4kg bei der Zweipunktekalibrierung und 0.05kg bei der Dreipunktekalibrierung ermittelt werden. Die Diagrammekurven können jedoch nicht mit denen aus der ersten Testphase verglichen werden, da die Hysterese nicht erfasst wurden.



43 Vergleich durchschnittliche Messabweichung bei Referenzpunkt KL66 MS5

Die Reproduzierbarkeit der Messwerte lag bei beiden Kalibrierungsverfahren durchschnittlich bei ungefähr +/- 1%. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass die gemessene Frequenzänderung über den gesamten Belastungsbereich mit lediglich 285Hz gering war. Zudem wurde jeder Belastungspunkt nur einmal gemessen, weshalb die statistische Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt ist. Die Messergebnisse sind daher mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren.

Montage des Sensors

Die Montage des DIGI SENS KL66 erwies sich grundsätzlich als unkompliziert. Aufgrund seiner kompakten Bauweise lässt sich der Sensor an geeigneten Stellen der Aufzugskonstruktion befestigen. Allerdings zeigten sich während der praktischen Montage einige Punkte, welche für eine spätere Weiterentwicklung beziehungsweise den regelmässigen Einsatz berücksichtigt werden sollten.

Eine erste Schwierigkeit stellte die Herstellung der benötigten M3 Gewindebohrungen dar. Aufgrund des geringen Bohrdurchmessers muss beim Bohren besonders sorgfältig gearbeitet werden, da die Gefahr des Abbrechens sehr hoch ist. Insbesondere bei schwer zugänglichen Montagepositionen kann dies den Installationsaufwand deutlich erhöhen und stellt somit einen praktischen Nachteil dar.

Ein weiterer Punkt betrifft das vom Hersteller vorgeschriebene Anzugsdrehmoment der Befestigungsschrauben. Gemäss Montageanleitung müssen diese mit einem Drehmoment von 128Ncm beziehungsweise 1,28Nm angezogen werden. Um dieses Drehmoment zuverlässig einzuhalten, ist ein geeignetes Drehmomentwerkzeug erforderlich. Für die Testzwecke wurden die beiden Sensorenden zusätzlich mit jeweils zwei M5 Muttern unterlegt, um den erforderlichen Abstand zwischen Sensor und Montagefläche herzustellen. Diese Lösung war für die Durchführung der Versuche ausreichend, stellt jedoch keine optimale Lösung für einen dauerhaften Einsatz dar. Bei einer möglichen Weiterentwicklung sollte deshalb eine passende Distanzhülse vorgesehen werden

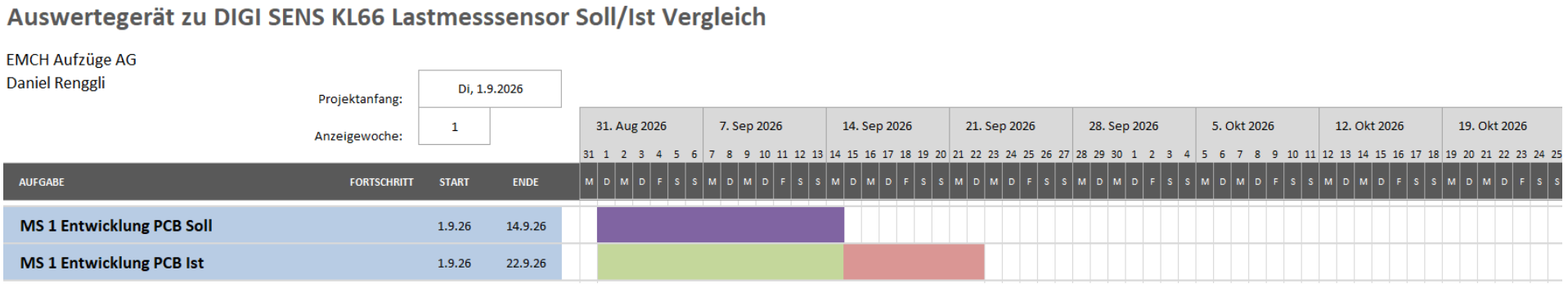


44 Befestigung KL66 Sensor Kabinenboden

Die Messreihen der zweiten Testphase sind im Anhang aufgeführt.

CONTROLLING MEILENSTEINE

MS1



45 Soll-Ist-Vergleich MS1

Der erste Meilenstein konnte mit einer Verzögerung von acht Tagen abgeschlossen werden. Hauptgrund dafür war, dass die Entwicklung der Leiterplatte deutlich mehr Zeit in Anspruch nahm als ursprünglich geplant. Insbesondere die Erstellung des Schaltplans sowie die Evaluation und Auswahl geeigneter Bauteile erwiesen sich als sehr zeitintensiv. Aufgrund der grossen Auswahl an verfügbaren Komponenten mussten zahlreiche Datenblätter geprüft und die Bauteile hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften und ihrer Eignung für die Anwendung verglichen werden. Zusätzlich waren für einige Komponenten keine passenden Footprints in der KiCad-Bibliothek vorhanden, weshalb diese anhand der jeweiligen Datenblätter selbst erstellt werden mussten.

Die erste Bestellung der Leiterplatte bei JLCPCB erfolgte am 20.09.2026. Bereits am folgenden Tag informierte JLCPCB per E-Mail über eine Unstimmigkeit beim ausgewählten OLED-Display. Der bestellte Artikel stimmte hinsichtlich seiner Abmessungen nicht mit dem auf der Leiterplatte verwendeten Footprint überein. Ursache dafür war eine unzureichende Kontrolle der mechanischen Abmessungen bei der Bauteilauswahl, wodurch versehentlich ein um einige Millimeter grösseres OLED-Display ausgewählt wurde. Der verwendete Footprint war zuvor anhand des Datenblatts des vorgesehenen SSD1306 erstellt worden. Da dieses Display bei JLCPCB jedoch nicht verfügbar war, wurde das entsprechende Bauteil aus der Bestellung entfernt und separat bei Reichelt Elektronik bestellt.

Einen weiteren Tag später meldete JLCPCB eine zusätzliche Abweichung zwischen Bauteil und Footprint. Diesmal betraf der Fehler die ESD-Schutzdiode im Bereich der Einspeisung. Der ursprünglich verwendete Footprint entsprach nicht dem ausgewählten Bauteil. Da der korrekte Footprint deutlich grössere Abmessungen aufwies, konnte das Bauteil aufgrund der umliegenden Komponenten nicht ohne Weiteres auf der bestehenden Leiterplatte platziert werden.

Aus diesem Grund wurde die gesamte Bestellung storniert und das PCB-Layout nochmals überarbeitet. Mehrere umliegende Bauteile mussten neu angeordnet werden, bis für den korrekten Footprint der ESD-Schutzdiode ausreichend Platz vorhanden war. Nach Abschluss dieser Anpassungen und einer erneuten Kontrolle konnte die überarbeitete Leiterplatte am 22.09.2026 erneut bestellt werden.

Gemäss Terminprogramm sollte die Platine am 04.10.2026 eintreffen. Glücklicherweise war dies schon am 02.10.2026 der Fall. Trotz verspäteter Bestellung früher eingetroffen als geplant. Dies ist sicherlich auf eine Zeitplanung mit Reserve zurückzuführen.

Leider musste festegestellt werden, dass 8 von 9 Taster auf den Platinen nicht aufgelötet waren. Der Grund für diesen Fehler lag nicht bei JLCPCB. Die fehlenden Tasten waren nicht in der Stückliste aufgeführt. Nach kurzer Recherche wurde festgestellt, dass sämtliche Bauteile, welche «_» in der Bezeichnung haben, nicht in die Stückliste aufgenommen werden. Wenn ein Bauteil ein «_» in der Bezeichnung hat ist das eine nicht gültige Bezeichnung. Somit wurde «Pfeiltaste_Auf», «Pfeilstaste_Ab», «Pfeiltaste_links», «Pfeiltaste_rechts», «Taste_OK», «Taste_ESC», «Taste_Home» und «Taste_WIFI» nicht bestückt. Einzig der «Reset1» Taster fand den Weg auf die Platine.

Nach einer ersten Inbetriebnahme der Platine wurde glücklicherweise festgestellt, dass alles so funktioniert wie es soll. Sogar die Tasten liessen sich mit einem Stück Draht provisorisch bedienen. Zum Glück war die Softwareentwicklung zu diesem Zeitpunkt soweit fortgeschritten, dass eine Bedienung per Webinterface möglich war. Somit war der Fehler nicht hindernd für den weiteren Verlauf des Projekts.

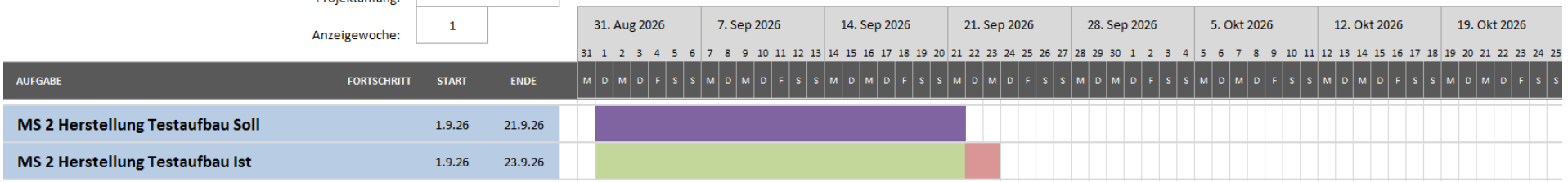
Anschliessend wurde der Fehler korrigiert, die Stückliste überprüft und eine erneute Bestellung der Platine aufgegeben. Diese ist am 21.10.2026 eingetroffen, voll funktionsfähig und komplett bestückt.

MS2

Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor Soll/Ist Vergleich

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 1



46 Soll-Ist-Vergleich MS2

Die Herstellung und Installation des Testaufbaus konnte am 23.09.2026 mit einer Verzögerung von zwei Tagen abgeschlossen werden. Der Verzug war hauptsächlich auf die Verzögerung aus Meilenstein 1 zurückzuführen. Aufgrund der Probleme bei der Bestellung der Leiterplatte stand weniger Zeit für die abschliessende Installation und Fertigstellung des Testaufbaus zur Verfügung.

Die Planung des Testaufbaus verlief zunächst wie vorgesehen. Die erforderlichen Skizzen konnten termingerecht erstellt werden. Gemäss ursprünglicher Terminplanung war die Besprechung mit dem AVOR-Mitarbeiter bis zum 04.09.2026 vorgesehen. Aus beruflichen Gründen konnte diese jedoch erst am 08.09.2026 stattfinden. Da zu diesem Zeitpunkt nur noch rund zehn Tage für die Fertigung zur Verfügung standen, wurden der AVOR-Mitarbeiter sowie der Fabrikationsleiter auf die Wichtigkeit der Termineinhaltung hingewiesen. Trotz der hohen Auslastung der Fabrikation erstellte der AVOR-Mitarbeiter noch am selben Tag die erforderlichen CAD-Zeichnungen und stellte diese zur Überprüfung zur Verfügung. Nach der Freigabe konnten die benötigten Bauteile durch die Fabrikationsabteilung gelasert, abgekantet und anschliessend zusammengeschweisst werden. Die fertiggestellte Metallkonstruktion war bereits am 15.09.2026 und damit drei Tage vor dem vorgesehenen Termin abholbereit. Die Konstruktion entsprach den erstellten Zeichnungen und war einwandfrei gefertigt. Anschliessend erfolgten die weiteren Arbeiten am Testaufbau, darunter die Montage auf der Holzplatte sowie die Installation der benötigten Komponenten.

Insgesamt konnte der beim Abschluss von MS1 entstandene Verzug von acht Tagen bis zum Abschluss des Testaufbaus auf zwei Tage reduziert werden. Dies war insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Planung und mechanische Fertigung des Testaufbaus weitgehend problemlos verliefen und die Metallkonstruktion sogar früher als vorgesehen fertiggestellt werden konnte.

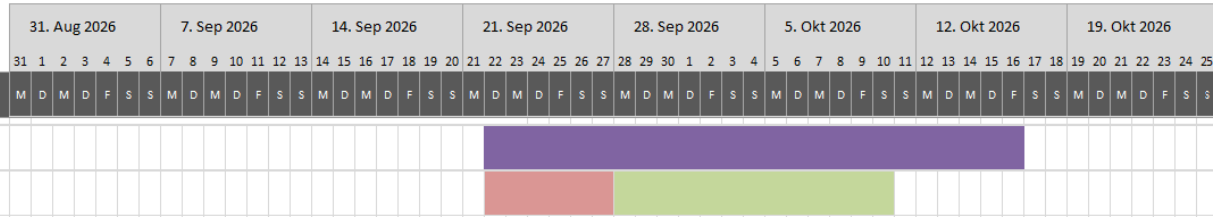
MS3

Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor Soll/Ist Vergleich

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 1

AUFGABE	FORTSCHRITT	START	ENDE
MS 3 Entwicklung Software Soll		22.9.26	16.10.26
MS 3 Entwicklung Software Ist		28.9.26	10.10.26



47 Soll-Ist-Vergleich MS3

Bevor Meilenstein drei in Angriff genommen werden konnte, wurde zunächst die Dokumentation der Meilensteine eins und zwei fertiggestellt. Aufgrund dessen sowie der zweitägigen Verzögerung aus MS2 konnte mit der Entwicklung der Software erst am 28.09.2026 begonnen werden. Dadurch erhöhte sich der Projektrückstand auf sechs Tage.

Die Software wurde mithilfe von künstlicher Intelligenz schrittweise entwickelt und aufgebaut. Eine Software in diesem Umfang wäre mit dem im Rahmen der Ausbildung vermittelten Fachwissen allein nur schwer umsetzbar gewesen. Der Einsatz von KI ermöglichte einerseits eine deutlich schnellere Entwicklung mit wenigen Fehlern. Andererseits konnten die einzelnen Programmschritte und Funktionen jeweils zusätzlich erklärt und nachvollzogen werden. Mithilfe der heute verfügbaren Technologien war es dadurch möglich, eine umfangreiche Software mit Fehlererkennungen, komfortablen Bedienfunktionen, Warnmeldungen und weiteren Funktionen zu realisieren. Die Programmierungsschritte wurden fortlaufend mithilfe des Testaufbaus und dem Versuchsaufbau getestet und optimiert. Nach Eintreffen der Platine am 02.10.2026 konnte die Software direkt mit der Leiterplatte weiterentwickelt werden.

Bei der Inbetriebnahme des Webinterfaces trat jedoch zunächst ein Problem auf. Obwohl das Webinterface grundsätzlich funktionierte, reagierte die Visualisierung teilweise verzögert und stockte unterschiedlich stark. Um die Ursache zu finden und das Problem zu beheben, wurde die Software mehrfach überarbeitet und optimiert. Insbesondere die Datenübertragung zum Webserver sowie verschiedene Aktualisierungs- und Übertragungszeiten wurden angepasst. Die Fehlersuche gestaltete sich dabei aufwendig, da zunächst keine eindeutige Ursache festgestellt werden konnte. Nach mehreren Optimierungsschritten konnte schliesslich eine zufriedenstellende Funktion erreicht werden.

Anschliessend wurde das Webinterface mit einem anderen, neueren Smartphone getestet. Dabei zeigte sich überraschenderweise, dass die Visualisierung auf diesem Gerät problemlos und mit einer guten Reaktionsgeschwindigkeit funktionierte. Dadurch konnte festgestellt werden, dass die zuvor beobachteten Verzögerungen nicht durch die entwickelte Software verursacht wurden, sondern hauptsächlich auf das verwendete Smartphone zurückzuführen waren.

Die grösste Schwierigkeit bei der Softwareentwicklung lag nicht in der eigentlichen Programmierung, sondern vielmehr in der Ausarbeitung einer sinnvollen und benutzerfreundlichen Struktur. Insbesondere die Gestaltung der Menüführung, die Auswahl der benötigten Funktionen sowie die Festlegung, wann Warn- und Hinweismeldungen erscheinen sollen, erwiesen sich als anspruchsvoller als ursprünglich erwartet. Während der Entwicklung entstanden laufend neue Ideen und Verbesserungsmöglichkeiten, wodurch bereits umgesetzte Funktionen mehrfach angepasst oder erweitert werden mussten. Dieser schrittweise Entwicklungs- und Verbesserungsprozess nahm zwar zusätzliche Zeit in Anspruch, führte jedoch zu einer durchdachten und komfortablen Bedienung der Auswerteeinheit.

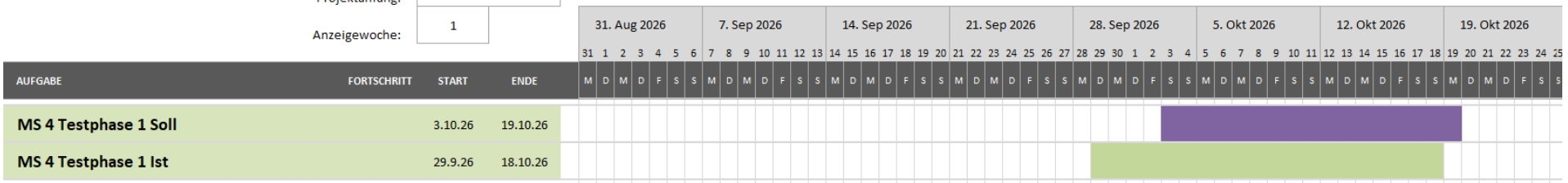
Trotz des anfänglichen Verzugs konnte Meilenstein drei bereits am 10.10.2026 und damit deutlich früher als ursprünglich geplant abgeschlossen werden. Der zuvor entstandene Projektrückstand von sechs Tagen konnte dadurch vollständig aufgeholt werden.

MS4

Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor Soll/Ist Vergleich

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 1



48 Soll-Ist-Vergleich MS4

Aufgrund des vorzeitigen Abschlusses von MS3 konnte die erste Testphase bereits am 29.09.2026 und somit vier Tage früher als ursprünglich geplant gestartet werden. Ursprünglich war vorgesehen, mit sämtlichen Flacheisenstärken identische Messreihen durchzuführen, um die Ergebnisse anschliessend miteinander vergleichen zu können. Aufgrund der Erkenntnisse und Feststellungen während der Versuche musste das geplante Vorgehen jedoch mehrfach angepasst werden. Die Untersuchungen entwickelten sich dadurch teilweise in eine andere Richtung als ursprünglich vorgesehen.

Ein wesentlicher Fehler bestand darin, dass die Befestigungsschrauben der Flacheisen auf dem Testaufbau zunächst lediglich handfest angezogen wurden. Dies führte dazu, dass über mehrere Tage hinweg Messwerte erfasst wurden, welche sich nachträglich als unzuverlässig herausstellten. Diese Erkenntnis war einerseits sehr frustrierend, da zahlreiche Messreihen wiederholt werden mussten und dadurch ein erheblicher zusätzlicher Zeitaufwand entstand. Andererseits verdeutlichte diese Erfahrung, wie wichtig es ist, sämtliche Einflussfaktoren eines Messaufbaus sorgfältig zu überprüfen. Trotz dieses Fehlers konnten aus den ursprünglichen Messungen wertvolle Erkenntnisse über den Einfluss der mechanischen Befestigung auf das Sensorverhalten gewonnen werden. Trotz der zahlreichen nicht verwertbaren Messreihen und der damit verbundenen zusätzlichen Arbeitsstunden konnte der vorgesehene Zeitplan eingehalten werden. Allerdings wurde der durch den vorzeitigen Abschluss von MS3 erarbeitete Zeitvorsprung während dieser Testphase grösstenteils aufgebraucht.

Der eigens entwickelte Testaufbau bewährte sich während der gesamten Testphase grundsätzlich sehr gut. Einzig die präzise Einstellung der gewünschten Belastungen mithilfe der Seilwaage erwies sich teilweise als mühsam und zeitaufwendig. Insbesondere bei höheren Belastungen nahm die Zugkraft auf das Spannschloss deutlich zu, wodurch sich dieses zunehmend schwerer verstellen liess. Das exakte Einstellen der einzelnen Gewichtsstufen erforderte daher viel Geduld und Nerven.

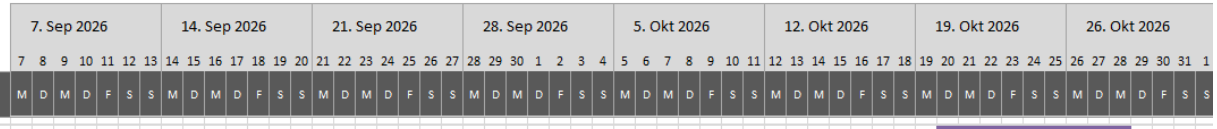
MS5

Auswertegerät zu DIGI SENS KL66 Lastmesssensor Soll/Ist Vergleich

EMCH Aufzüge AG
Daniel Renggli

Projektanfang: Di, 1.9.2026
Anzeigewoche: 2

AUFGABE	FORTSCHRITT	START	ENDE
MS 5 Testphase 2 Soll		20.10.26	28.10.26
MS 5 Testphase 2 Ist		22.10.26	26.10.26



49 Soll-Ist-Vergleich MS5

Die letzte Projektphase konnte mit einer leichten Verzögerung von zwei Tagen gestartet werden. Bereits zu Beginn zeigte sich, dass die Testanlage für die Erprobung des Sensors nur bedingt geeignet war. Aufgrund der massiven Bauweise der Aufzugsanlage und der damit verbundenen Platzierung des Sensors am Kabinenboden war es nicht möglich, die Prüflasten mit geeigneten Hilfsmitteln in die Kabine einzubringen. Stattdessen musste jede einzelne Gewichtsplatte von Hand positioniert werden. Dieser zusätzliche Aufwand war ursprünglich nicht vorgesehen. Aus diesem Grund wurden die Messreihen möglichst einfach gehalten und auf die wesentlichen Untersuchungen beschränkt. Dadurch erwies sich die letzte Projektphase als körperlich sehr anstrengend und wenig rückenschonend. Trotz der erschwerten Bedingungen konnten wertvolle Erkenntnisse gewonnen und wichtige Messergebnisse erzielt werden.

Dieser Meilenstein verdeutlichte besonders gut, dass sich nicht immer alle Arbeiten wie ursprünglich geplant umsetzen lassen. Es ist daher wichtig, flexibel auf unvorhergesehene Situationen zu reagieren und das Vorgehen den vorhandenen Bedingungen anzupassen, um dennoch bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

Der Meilenstein MS5 konnte am 26.10.2026 und somit zwei Tage früher als geplant erfolgreich abgeschlossen werden. Damit ist die Projektrealisierung beendet. Daher bleibt noch genügend Zeit für die Erstellung des Projektabschlusses, die Fertigstellung der Dokumentation sowie die fristgerechte Abgabe der Diplomarbeit.

PROJEKTABSCHLUSS

FAZIT

KL66 Sensor

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der DIGI SENS KL66 grundsätzlich Potenzial für eine präzise Lastmessung an Aufzugsanlagen besitzt, jedoch mit gewissen Einschränkungen. Aufgrund der festgestellten Nullpunktverschiebungen bei grösseren mechanischen Verformungen sowie der verhältnismässig starken Auswirkungen von Frequenzschwankungen bei kleinen Verformungen ist der Sensor nicht für jede Aufzugsanlage gleichermassen geeignet. Unter kontrollierten Laborbedingungen und bei einem geeigneten Frequenzbereich konnten sehr gute Messergebnisse erzielt werden. Im praktischen Einsatz an einer Aufzugsanlage gestaltete es sich hingegen deutlich schwieriger, die erforderlichen mechanischen Bedingungen sicherzustellen, um eine präzise und stabile Lastmessung zu gewährleisten. Insbesondere bei Modernisierungen und Spezialanlagen sind die notwendigen mechanischen Eigenschaften teilweise nicht vorhanden, nur eingeschränkt gegeben oder nicht ausreichend bekannt. Somit kann die Eignung des Sensors nicht für jede Anlage garantiert werden.

Bei Aufzugsanlagen, welche über ein speziell auf den Sensor abgestimmtes Bauteil verfügen, ist der Einsatz des KL66 hingegen technisch durchaus möglich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere auf den kalibrierten Referenzpunkten sehr genaue Messergebnisse erreicht werden können. Mithilfe der entwickelten Dreipunktkalibrierung lassen sich beispielsweise definierte Lastzustände wie Leerlast und Überlast mit hoher Genauigkeit erkennen.

Hinsichtlich der Montage weist der Sensor gewisse Nachteile auf. Für die fachgerechte Befestigung wird ein Drehmomentwerkzeug benötigt, mit welchem sich das vorgeschriebene geringe Anzugsdrehmoment von 128Ncm präzise einstellen lässt. Da solche Werkzeuge in der Aufzugsmontage nicht zur üblichen Ausrüstung gehören, müssten diese für die entsprechenden Monteure zusätzlich beschafft werden. Darüber hinaus erweist sich die Befestigung mittels M3 Schrauben insbesondere an massiven Stahlträgern oder Seilendpunkten als wenig montagefreundlich. Die erforderlichen kleinen Bohrungen bergen ein erhöhtes Risiko für Bohrerbrüche. Auch die Handhabung der kleinen Befestigungsschrauben sind nicht optimal.

Im Hinblick auf eine mögliche Weiterentwicklung müsste insbesondere das Verhalten der festgestellten Nullpunktverschiebungen nochmals vertieft untersucht werden. Zusätzlich sollte geprüft werden, inwiefern sich die Gewichtsschwankungen bei kleinen Frequenzänderungen durch softwaretechnische Massnahmen reduzieren lassen. Durch entsprechende Verbesserungen könnte der nutzbare Einsatzbereich des Sensors erweitert und dessen Praxistauglichkeit deutlich erhöht werden. Abschliessend muss festgehalten werden, dass der DIGI SENS KL66 in seiner derzeitigen Form für einen universellen Einsatz bei den Aufzugsanlagen der EMCH Aufzüge AG nicht ausreichend praxistauglich ist. Der wesentliche Grund liegt in der grossen Vielfalt und den unterschiedlichen konstruktiven Ausführungen der Aufzugsanlagen, welche ein wesentliches Merkmal des Unternehmens darstellt.

Auswerteeinheit

Die Entwicklung des Prototyps zur Auswertung des Sensorsignals kann insgesamt als sehr erfolgreich beurteilt werden. Mit seinen Abmessungen von 110*100 mm ist die Leiterplatte hinsichtlich ihrer Grösse mit herkömmlichen Auswertegeräten vergleichbar. Die Anordnung der einzelnen Bauteile erwies sich im praktischen Einsatz als zweckmässig und gut durchdacht. Die Bedienung ist intuitiv und übersichtlich gestaltet. Die Anschlussklemmen sind gut zugänglich, sinnvoll positioniert und eindeutig beschriftet, wodurch eine einfache und übersichtliche Verdrahtung ermöglicht wird.

Auch das entwickelte Webinterface konnte während der Testphasen überzeugen. Sämtliche Funktionen arbeiteten zuverlässig und die Möglichkeit, die WLAN-Verbindungszeit bei Bedarf zu verlängern, erwies sich als besonders hilfreich. Mit einer Reichweite von ungefähr 10m erreicht die WLAN-Verbindung zwar keine aussergewöhnlich hohe Empfangsdistanz, ist für die vorgesehenen Anwendungen jedoch durchaus ausreichend. Die übersichtlich aufgebaute Menüstruktur ist weitgehend selbsterklärend und ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die verschiedenen Funktionen und Messdaten.

Die integrierten Status-LEDs ermöglichen zudem eine schnelle und unkomplizierte Kontrolle der Relaiszustände sowie des WLAN. Dadurch können wichtige Betriebszustände unmittelbar erkannt werden, ohne dass zusätzliche Menüs aufgerufen werden müssen.

Im Hinblick auf eine mögliche Weiterentwicklung wäre die Integration eines akustischen Signalgebers in Form eines Buzzers eine sinnvolle Ergänzung. Dieser könnte beispielsweise den erfolgreichen Abschluss eines Kalibriervorgangs akustisch bestätigen. Besonders bei der Bedienung direkt am Gerät wäre diese Funktion hilfreich, da die Aufzugskabine während der eigentlichen Messung verlassen werden muss, um das Messergebnis nicht durch das zusätzliche Gewicht des Bedieners zu beeinflussen. Durch ein akustisches Signal könnte dem Bediener mitgeteilt werden, wann die Messung abgeschlossen ist und die Kabine wieder betreten werden darf.

Zusammenfassend hat sich die entwickelte Auswerteeinheit sowohl hinsichtlich ihrer Hardware als auch ihrer Software als praxistauglich erwiesen. Sie stellt somit ein gelungenes Ergebnis der Entwicklungsarbeit dar und bietet eine gute Grundlage für mögliche zukünftige Weiterentwicklungen.

SCHLUSSABRECHNUNG

Pos.	Kostenposition	Beschreibung	Budget CHF	Ausgaben CHF
1	**Hardware**	**Sensor KL66**		
		Sensor KL66		*108.00*
Zwischentotal Pos. 1			***108.00***	***108.00***
2	**Hardware**	**Mikrocontroller / Display**		
		Mikrocontroller		*7.60*
		Display		*6.15*
		Versandkosten		*9.45*
Zwischentotal Pos. 2			***120.00***	***23.20***
3	**Hardware**	**PCB**		
		1. PCB inkl. Versandkosten		*192.15*
		1. Zollgebühren		*40.10*
		2. PCB inkl. Versandkosten		*157.15*
		2. Zollgebühren		*36.75*
Zwischentotal Pos. 3			***250.00***	***426.15***
4	**Hardware**	**Gehäuse**		
		*Kasten 175*125*75mm*		*23.15*
Zwischentotal Pos. 4			***80.00***	***23.15***
5	**Hardware**	**Testaufbau**		
		Einkauf Baumarkt		*84.80*
		Netzteil 24VDC		*31.60*
		Metallkonstruktion pauschal		*150.00*
Zwischentotal Pos. 5			***250.00***	***266.40***
6	**Software**	**Lizenzgebühren**		
		Microsoft Visual Studio		*17.10*
		Chat GPT		*40.00*
Zwischentotal Pos. 6			***50.00***	***57.10***
7	**Messgerät**	**Oszilloskop Multimeter**		
		Oszilloskop Multimeter		*95.70*
		Zollgebühren		*19.15*
Zwischentotal Pos. 7			***95.00***	***114.85***

Pos.	Kostenposition	Beschreibung	Budget CHF	Ausgaben CHF
8	**Messgerät**	**Seilwaagen**		
		Seilwaagen 100kg		
Zwischentotal Pos. 8			***126.00***	***125.10***
9	**Messgerät**	**Drehmomentschraubendreher**		
		Drehmomentschraubendreher		*89.90*
Zwischentotal Pos. 9			***90.00***	***89.90***
10	**Messgerät**	**2. Messsystem**		
		Dinacell Auswertegerät VK-3SV		*196.80*
		Dinacell Lastmesssensor SV-3000		*186.90*
		*Kasten 250*175*150mm*		*62.40*
Zwischentotal Pos. 10			***0.00***	***445.40***
Gesamttotal			***1169.00***	***1679.25***
Budgetvorgabe			*1500.00*	
Reserve			*331.00*	
Mehrkosten				***179.25***

6 Tabelle Schlussabrechnung

Das ursprünglich festgelegte Projektbudget konnte trotz der eingeplanten Reserve nicht eingehalten werden. Im Verlauf des Projekts entstanden zusätzliche Kosten, die bei der ursprünglichen Budgetplanung nicht berücksichtigt beziehungsweise nicht einkalkuliert worden waren.

Einerseits musste die Leiterplatte aufgrund der fehlenden Taster erneut bestellt werden. Andererseits war das Vergleichsmesssystems in der ursprünglichen Budgetplanung nicht vorgesehen. Diese unvorhergesehenen Ausgaben führten zu Mehrkosten von insgesamt CHF 179.25, was einer Budgetüberschreitung von 8.4 % entspricht.

ZIELERREICHUNG

Sollziele	Status
S01 – Hardwareprototyp	☑
Es ist ein funktionsfähiger Hardwareprototyp zu entwickeln, welcher sämtliche für die Messwerterfassung und Auswertung erforderlichen Komponenten beinhaltet. Der Prototyp muss eine geeignete Mikroprozessoreinheit enthalten.	
S02 – Anschluss DIGI SENS KL66	☑
Der DIGI SENS KL66 muss elektrisch an das Auswertegerät angeschlossen werden können.	
S03 – Signalerfassung	☑
Die Software muss das Sensorsignal des DIGI SENS KL66 zuverlässig erfassen und auswerten können.	
S04 – Lastberechnung	☑
Aus dem erfassten Sensorsignal muss ein Lastwert in kg berechnet werden können.	
S05 – Kalibrierung	☑
Das System muss eine Kalibrierung des Messwertes ermöglichen. Die Kalibrierung muss reproduzierbar durchführbar sein.	
S06 – Erkennung von Kleinstlasten	☑
Das System muss eine ausreichend hohe Messauflösung und Messgenauigkeit aufweisen, um geringe Laständerungen innerhalb des definierten Messbereichs erkennen zu können.	
S07 – Anzeige	☑
Der aktuelle Messwert bzw. Lastwert muss auf einem Display dargestellt werden können. Zusätzlich sollen relevante Betriebs- und Diagnoseinformationen angezeigt werden.	

Sollziele	Status

S08 – Physische Bedienung ☑

Die Bedienung des Auswertegeräts muss über physische Bedienelemente und das Display möglich sein. Mindestens folgende Funktionen müssen darüber erreichbar sein:

- Navigation durch das Menü
- Anzeige des aktuellen Lastwertes
- Durchführung der Kalibrierung
- Einstellung der relevanten Parameter
- Anzeige von Diagnoseinformationen

S09 – Lastschwellwerte ☑

Es müssen vier frei definierbare Lastschwellwerte eingestellt werden können. Die Schwellwerte sollen abhängig vom vorgesehenen Anwendungsfall parametriert werden können.

S10 – Relaisausgänge ☑

Die definierten Lastschwellwerte müssen über potenzialfreie Relaiskontakte ausgegeben werden können. Das Schaltverhalten der Relais muss eindeutig definiert und reproduzierbar sein

S11 – Diagnose ☑

Das Gerät muss relevante Informationen zum Zustand des Sensors und der Messwerterfassung anzeigen können.

S12 – Speicherung ☑

Die für den Betrieb erforderlichen Kalibrier- und Einstellwerte müssen dauerhaft gespeichert werden können, sodass diese nach einem Neustart des Systems wieder zur Verfügung stehen.

Sollziele	Status
S13 – Versorgungsspannung	☑
Das Auswertegerät soll für den Betrieb an einer Gleichspannungsversorgung 24V DC ausgelegt werden.	
S14 – Gehäuse	☑
Der Prototyp soll in einem geeigneten Gehäuse vor mechanischen Einwirkungen geschützt werden.	
S15 – Abgabetermin	☑
Das Projekt soll bis zum 09.11.2026 realisiert sein.	
S16 – Finanzierung	☒
Das vorgegebene Budget von 1500.- soll eingehalten werden	

7 Tabelle Zielerreichung Sollziele

Wunschziele	Status
W01 – Webinterface	☑
Das Auswertegerät soll über ein Webinterface bedient und parametriert werden können. Das Webinterface soll insbesondere ermöglichen: • Anzeige des aktuellen Lastwertes • Anzeige von Sensorinformationen • Durchführung bzw. Unterstützung der Kalibrierung • Einstellung von Lastschwellwerten • Anzeige von Diagnoseinformationen	
W02 – Angepasstes Gehäuse	☒
Für den Prototyp soll ein an die Hardware angepasstes Gehäuse (3D Druck) entwickelt werden.	
W03 – Mehrere Sensoren	☑
Die Hardware soll für den möglichen Anschluss mehrerer DIGI SENS KL66 Sensoren vorbereitet werden.	
W04 – Referenzsystem	≈
Die Messgenauigkeit des entwickelten Systems soll mit einem geeigneten Referenzsystem überprüft werden.	

8 Tabelle Zielerreichung Wunschziele

REFLEXION

Im Grossen und Ganzen bin ich mit dem Ergebnis meiner Diplomarbeit sehr zufrieden. Trotz einiger Herausforderungen, Rückschläge und unerwarteter Schwierigkeiten ist es mir gelungen, ein Resultat zu erzielen, auf das ich stolz sein kann.

Die Entwicklung der Leiterplatte bereitete mir deutlich mehr Schwierigkeiten als ursprünglich erwartet. Bereits in dieser frühen Projektphase geriet ich gegenüber dem Zeitplan in Rückstand. Insbesondere die Fehlermeldungen von JLCPCB bei der ersten Bestellung wirkten sich vorübergehend negativ auf meine Motivation aus. Zeitweise zweifelte ich sogar daran, ob das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden könnte. Dies vor allem deshalb, weil ich die Entwicklung der Leiterplatte ursprünglich als den einfacheren Teil im Vergleich zur anschliessenden Softwareentwicklung eingeschätzt hatte. Dennoch gelang es mir, mich wieder zu motivieren und so lange an den Problemen zu arbeiten, bis sämtliche Fehler behoben waren.

Glücklicherweise erwies sich die anschliessende Softwareentwicklung mithilfe künstlicher Intelligenz als gut machbar. Es war faszinierend zu erleben, welche Möglichkeiten die heutigen digitalen Technologien bieten und wie leistungsfähig diese bereits sind. Diese positiven Erfahrungen gaben mir neuen Antrieb und liessen mich wieder zuversichtlicher auf den weiteren Projektverlauf blicken. Somit konnte ich den Rückstand im Zeitplan wieder gut machen.

Als schliesslich die bestellte Leiterplatte eintraf und ich feststellen musste, dass die Taster fehlten, war die Enttäuschung zunächst entsprechend gross. Bereits nach kurzer Zeit relativierte sich dieser Rückschlag jedoch, da die Leiterplatte ansonsten einwandfrei funktionierte. Rückblickend war die Entwicklung der Leiterplatte eine regelrechte Achterbahnfahrt der Gefühle, die glücklicherweise zu einem erfolgreichen Abschluss führte.

Auch mit dem konstruierten Testaufbau bin ich sehr zufrieden. Die Konstruktion erfüllte ihren vorgesehenen Zweck und ermöglichte die Durchführung der geplanten Messversuche. Besonders viel Freude bereitete mir das Konstruieren und Erstellen der Skizzen. Das Entwickeln eigener Lösungsansätze und das Austüfteln technischer Konstruktionen gehören zu den Tätigkeiten, die mir besonders Spass machen.

Die anschliessende Testphase erwies sich rückblickend jedoch als wesentlich aufwendiger als erwartet und erforderte viel Geduld und Disziplin. Besonders ärgerlich war die Erkenntnis, dass zahlreiche Messungen aufgrund der nicht ausreichend angezogenen Schrauben an den Flacheisen unnötig durchgeführt worden waren. Dass mir ein solch einfacher, aber entscheidender Fehler unterlaufen war, frustrierte mich sehr. Die dadurch entstandene Mehrarbeit wirkte sich gegen Ende des Projekts spürbar auf meine Motivation aus. Dennoch verlor ich mein Ziel nicht aus den Augen. Mir war bewusst, wie viel Arbeit bereits investiert worden war und wie nahe ich dem erfolgreichen Projektabschluss stand. Aufzugeben kam für mich deshalb nicht infrage. Stattdessen arbeitete ich konsequent weiter, bis auch die letzten Herausforderungen bewältigt waren.

Besonders zufrieden bin ich mit meinem Zeitmanagement und der gewählten Reihenfolge der einzelnen Meilensteine. Obwohl es während der Projektbearbeitung teilweise zu Verzögerungen kam, erwies sich die grundsätzliche Planung als sehr zweckmässig. Die einzelnen Arbeitsschritte waren so aufeinander abgestimmt, dass keine Wartezeiten aufgrund von Lieferfristen oder fehlenden Materialien entstanden. Sämtliche benötigten Komponenten standen jeweils rechtzeitig zur Verfügung, sodass ich kontinuierlich am Projekt weiterarbeiten konnte. Dadurch entstand trotz der verschiedenen Rückschläge kein übermässiger Zeitdruck. Ich konnte die einzelnen Aufgaben Schritt für Schritt bearbeiten und mich auf die jeweiligen Herausforderungen konzentrieren.

Die Arbeit hat mir gezeigt, dass auch bei einer sorgfältigen Planung nicht alle Schwierigkeiten vorhersehbar sind. Entscheidend ist jedoch, wie man mit diesen Situationen umgeht und welche Lösungen daraus entstehen. Umso erfreulicher ist es für mich, dass ich das Projekt trotz aller Herausforderungen erfolgreich abschliessen konnte.

LESSONS LEARNED

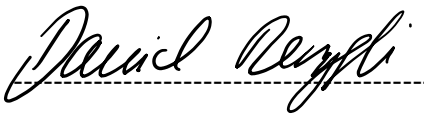
Abschliessend kann ich festhalten, dass mich diese Diplomarbeit nicht nur fachlich, sondern auch persönlich weitergebracht hat.

Besonders wertvoll ist für mich die Erkenntnis, dass auch vermeintlich kleine Fehler erhebliche Auswirkungen auf den Projektverlauf haben können. Gleichzeitig habe ich gelernt, dass sich mit Ausdauer, Flexibilität und einem lösungsorientierten Vorgehen auch unerwartete Herausforderungen erfolgreich bewältigen lassen. Zudem hat sich gut gezeigt, dass eine saubere Zeitplanung sowie ein durchdachter Ablauf der Arbeitsschritte elementar wichtig sind. Diese Erfahrungen werde ich sowohl bei zukünftigen Projekten als auch in meinem beruflichen Alltag nutzen.

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst habe. Alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel wurden angegeben.

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurde ChatGPT unterstützend eingesetzt. Die KI wurde für die Erstellung der Software und um erste Textentwürfe zu strukturieren sowie sprachliche Formulierungen zu verbessern eingesetzt. Alle inhaltlichen Entscheidungen, Bewertungen und Schlussfolgerungen wurden vom Verfasser selbst getroffen.

Unterschrift	Ort / Datum
	Hasle, 07.11.2026

VERDANKUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen in meinem Umfeld herzlich bedanken, die mich während der Erarbeitung meiner Diplomarbeit in irgendeiner Form unterstützt und damit zum erfolgreichen Abschluss beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Peter Lischer seitens der TEKO, der mir während der Projektbearbeitung mit wertvollen fachlichen Ratschlägen und hilfreichen Anregungen zur Seite stand. Seine Unterstützung und seine fachlichen Tipps haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich mich bei der EMCH Aufzüge AG bedanken. Das Unternehmen hat mich nicht nur bei der Realisierung meiner Diplomarbeit durch die Herstellung des Testaufbaus und die zur Verfügung gestellte Testanlage unterstützt, sondern stand mir auch während meiner gesamten Ausbildungszeit unterstützend zur Seite. Diese wertvolle Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen weiss ich sehr zu schätzen.

BEGRIFFSVERZEICHNIS

Baudrate	Anzahl der Signalzustandsänderungen beziehungsweise Symbole pro Sekunde bei einer digitalen Datenübertragung. Die Einheit ist Baud (Bd).
CAD	Computer-Aided Design – Computergestütztes Konstruieren und Zeichnen von technischen Bauteilen, Baugruppen oder Schaltungen.
CSS	Cascading Style Sheets – Stylesheet-Sprache zur Gestaltung des Aussehens von Webseiten, beispielsweise Farben, Schriftarten und Layout.
DC / DC Wandler	Elektronischer Spannungswandler, der eine Gleichspannung in eine andere Gleichspannung umwandelt. Je nach Bauart mit oder ohne galvanische Trennung.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – Nichtflüchtiger elektronischer Speicher, dessen Daten elektrisch gelöscht und neu geschrieben werden können.
ESD	Electrostatic Discharge – Elektrostatische Entladung, die elektronische Bauteile beschädigen oder deren Funktion beeinträchtigen kann.
Footprint	Darstellung der Anschlussflächen und mechanischen Abmessungen eines elektronischen Bauteils auf einer Leiterplatte.
galvanische Trennung	Elektrische Trennung zweier Stromkreise ohne direkte leitende Verbindung. Die Übertragung von Energie oder Signalen erfolgt beispielsweise über Transformatoren oder Optokoppler.
GPIO	General Purpose Input/Output – Frei programmierbare Ein- und Ausgänge eines Mikrocontrollers zur Verarbeitung und Ausgabe digitaler Signale.
HMI	Human Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle. Ein HMI ist eine Bedien- und Anzeigeoberfläche, über die ein Mensch mit einer Maschine oder Steuerung kommunizieren kann.
HTML	Hypertext Markup Language – Auszeichnungssprache zur Strukturierung und Darstellung von Inhalten auf Webseiten.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol – Kommunikationsprotokoll zur Übertragung von Daten zwischen einem Webserver und einem Webbrowser.

I^2C	Inter-Integrated Circuit – Serielles Kommunikationssystem zur Datenübertragung zwischen elektronischen Bauteilen über zwei Signalleitungen (SDA und SCL).
NC	Normally Closed – Öffnerkontakt eines Relais, der im unbetätigten Zustand geschlossen ist.
NO	Normally Open – Schliesserkontakt eines Relais, der im unbetätigten Zustand geöffnet ist.
Optokoppler	Elektronisches Bauteil zur galvanisch getrennten Übertragung elektrischer Signale mithilfe von Licht.
PCB	Printed Circuit Board – Leiterplatte zur mechanischen Befestigung und elektrischen Verbindung elektronischer Bauteile.
ppm	Parts per Million – Einheit zur Angabe sehr kleiner relativer Abweichungen. 1ppm entspricht 0,0001%.
Pull-up	Widerstand, der eine Signalleitung mit der positiven Versorgungsspannung verbindet und dadurch einen definierten logischen High-Pegel sicherstellt, sofern kein anderer Teilnehmer die Leitung auf Low zieht.
RC-Glied	Elektrische Schaltung aus einem Widerstand (R) und einem Kondensator (C), beispielsweise zur Signalfilterung, Zeitverzögerung oder Entstörung.
SCL	Serial Clock – Taktleitung der I^2C-Schnittstelle zur Synchronisierung der Datenübertragung.
SDA	Serial Data – Datenleitung der I^2C-Schnittstelle zur bidirektionalen Übertragung von Informationen.
TTL	Transistor-Transistor Logic – Digitale Logikfamilie mit definierten Spannungspegeln zur Unterscheidung zwischen logisch 0 und logisch 1. Klassische TTL arbeitet mit einer Versorgungsspannung von 5V.
Vias	Elektrisch leitende Durchkontaktierungen, welche Leiterbahnen unterschiedlicher Kupferlagen einer Leiterplatte miteinander verbinden.
WLAN	Wireless Local Area Network – Drahtloses lokales Netzwerk zur Kommunikation und Datenübertragung zwischen Geräten.

9 Tabelle Begriffsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1 EMCH DESIGN LIFT 8
2 PROJEKTORGANISATION 18
3 PROJEKTSTRUKTURPLAN 19
4 GANNT DIAGRAMM 21
5 MATRIX SWOT ANALYSE 24
6 SYSTEMÜBERSICHT 25
7 KONZEPTVISUALISIERUNG AUSWERTEGERÄT 29
8 KONZEPTVISUALISIERUNG TESTAUFBAU 32
9 MESSABWEICHUNG ARDUINO UNO R4 WIFI 36
10 ARDUINO UNO R4 WIFI 37
11 MESSABWEICHUNG RASPBERRY PI PICO 2W 39
12 RASPBERRY PI PICO 2W 39
13 DISPLAY SSD1306 40
14 MESSUNG TTL-SIGNAL OSZILLOSKOP 46
15 CUBO S SPCM131808T 48
16 3D ANSICHT PCB 50
17 SKIZZE TESTAUFBAU 51
18 HS-100 HÄNGEWAAGE 52
19 WANTENSPANNER M8 52
20 BEISPIELBILD DINACELL VK-3SV AUSWERTEEINHEIT 53
21 LASTMESSSENSOR SV-3000 53
22 TESTAUFBAU AUSWERTEGERÄTE 54
23 TESTAUFBAU SEILWAAGEN 54
24 PROVISORISCHER VERSUCHSAUFBAU PCB 55
25 BERECHNUNG MEHRPUNKTKALIBRIERUNG 56
26 BERECHNUNGSWEG QUADRATISCHE KENNLINIENKALIBRIERUNG 58
27 FREQUENZDIFFERENZ KENNLINIE 59
28 MESSABWEICHUNG QUADRATISCHE KENNLINIENKALIBRIERUNG 60
29 MESSABWEICHUNG MEHRPUNKTKALIBRIERUNG 60
30 ÜBERSICHT SOFTWARESTRUKTUR 61
31 ÜBERSICHT MENÜSTRUKTUR 67
32 WEBINTERFACE 68
33 NULLPUNKTVERSCHIEBUNG KL66 8MM/10MM FLACHEISEN 71
34 VERGLEICH DURCHSCHNITTLICHE MESSABWEICHUNG KL66 MS4 72
35 VERGLEICH DURCHSCHNITTLICHE MESSABWEICHUNG BEI REFERENZPUNKT KL66 MS4 73
36 MESSABWEICHUNG DINACELL SV-3000 MS4 73
37 VERGLEICH DURCHSCHNITTLICHE MESSABWEICHUNG BEI REFERENZPUNKT DINACELL MS4 74
38 MOTORENTRÄGER TESTANLAGE 76
39 BODENRAHMEN TESTANLAGE 77
40 MARKIERUNG POSITION PRÜFPLATTEN 78
41 PRÜFPLATTEN 10STÜCK À 43KG 78
42 VERGLEICH DURCHSCHNITTLICHE MESSABWEICHUNGEN KL66 MS5 80
43 VERGLEICH DURCHSCHNITTLICHE MESSABWEICHUNG BEI REFERENZPUNKT KL66 MS5 81
44 BEFESTIGUNG KL66 SENSOR KABINENBODEN 82
45 SOLL-IST-VERGLEICH MS1 83
46 SOLL-IST-VERGLEICH MS2 85
47 SOLL-IST-VERGLEICH MS3 86
48 SOLL-IST-VERGLEICH MS4 88
49 SOLL-IST-VERGLEICH MS5 89

TABELLENVERZEICHNIS

1 TABELLE FINANZIERUNG 22
2 TABELLE SWOT ANALYSE 24
3 TABELLE LEISTUNGSVERZEICHNIS 33
4 TABELLE LEISTUNGSBILANZ PCB 47
5 TABELLE LAGENAUFBAU PCB 49
6 TABELLE SCHLUSSABRECHNUNG 93
7 TABELLE ZIELERREICHUNG SOLLZIELE 96
8 TABELLE ZIELERREICHUNG WUNSCHZIELE 97
9 TABELLE BEGRIFFSVERZEICHNIS 102

QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

www.emch.com

www.chatgpt.com

www.visualstudio.microsoft.com/de

www.digitec.ch

www.brack.ch

www.reichelt.com

www.legrand.fi

www.galaxus.ch

www.hornbach.ch

www.dinacell.com

www.swibox.ch

www.tina.com

www.kicad.org

www.digisens.ch/en/

www.jlcpcb.com/parts

www.pip-assets.raspberrypi.com/categories/1088-raspberry-pi-pico-2-w/documents/RP-008304-DS-3-pico-2-w-datasheet.pdf

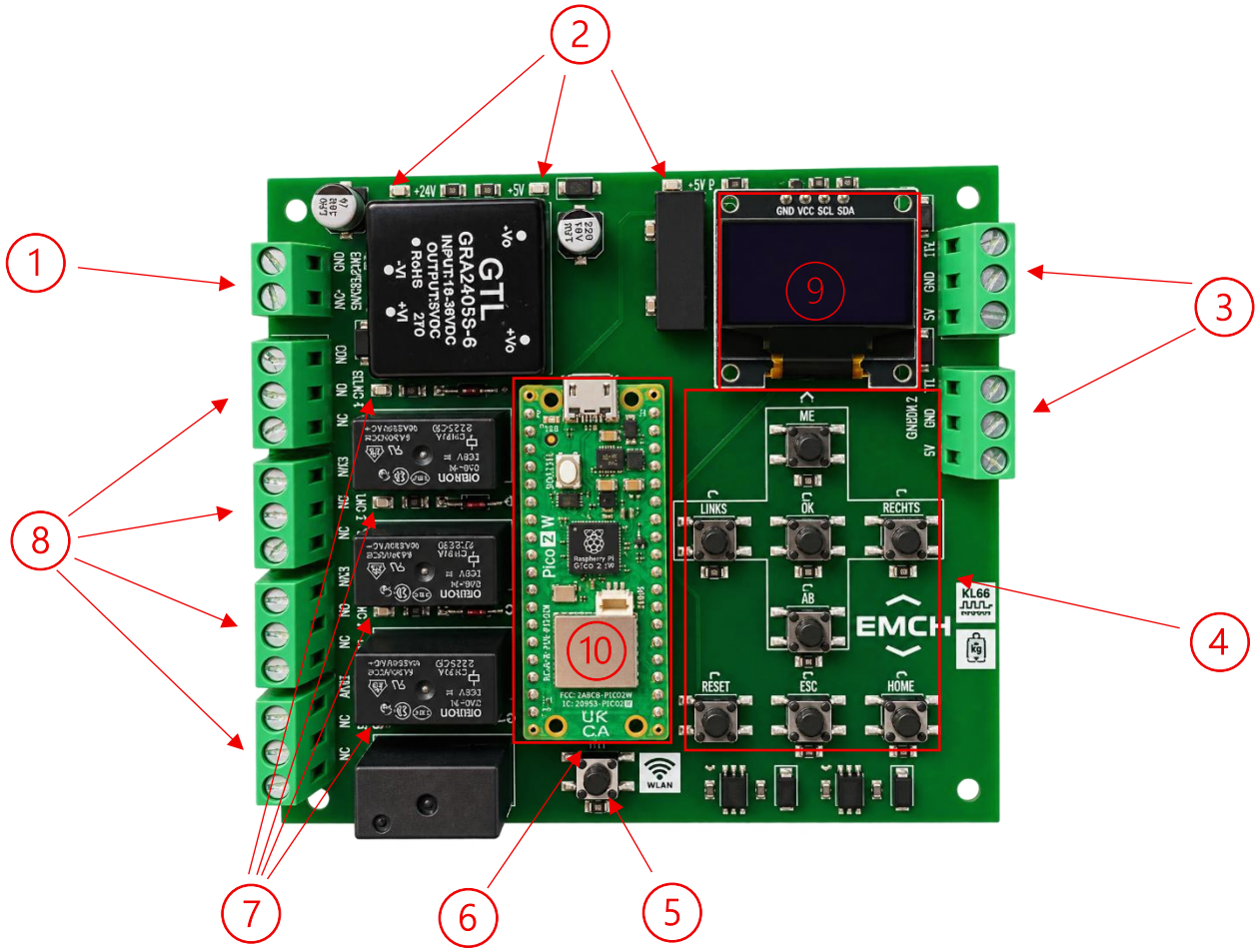
www.dinacell.com/wp-content/documentation/manuals/vk/vk-3sv/D1276-00%20%28EN%29.pdf

www.dinacell.com/wp-content/documentation/manuals/sv-3000/D2030-00%20%28DE%29.pdf

ANHANG

BEDIENUNGSANLEITUNG

Geräteübersicht



1	Anschluss Einspeisung
2	Status LED Spannungsversorgung
3	Anschluss Sensor KL66
4	Bedientasten
5	WIFI Taste
6	Status LED WLAN
7	Staus LED Relaisausgänge
8	Anschluss potentialfreie Ausgänge
9	OLED Display SSD1306
10	Mikrocontroller Raspberry Pico 2W

Technische Daten

Versorgungsspannung	+24V DC
Leistung	max. 3W
potentialfreie Kontakte 1*NC/NO	max. 230V / 1A
Abmessung Gehäuse	175 * 125 * 75mm

Bedientasten

Pfeiltaste AUF	Navigation im Menü, einstellen Werte kurzer Tastendruck = +1 langer Tastendruck = +10
Pfeilaste AB	Navigation im Menü, einstellen Werte kurzer Tastendruck = -1 langer Tastendruck = -10
Pfeiltaste LINKS	Navigation im Menü, einstellen Werte kurzer Tastendruck = -10 langer Tastendruck = -100
Pfeiltaste RECHTS	Navigation im Menü, einstellen Werte kurzer Tastendruck = +10 langer Tastendruck = +100
Taste OK	Eingabe bestätigen
Taste ESC	zurück in der Menüführung
Taste HOME	zurück zur Hauptanzeige
Taste RESET	löst Neustart des Microcontroller aus
Taste WIFI	startet das WLAN

Anschluss Sensor

Der Sensor wird am Anschluss Sensor 1 angeschlossen. Die Klemmleiste Sensor 2 dient als Reserve und ist nicht aktiv.

weiss	GND
braun	+5V DC
grün	TTL-Signal

Aktivierung WLAN

1) Taster «WIFI» betätigen bis die Staus LED leuchtet.
2) Mobiltelefon oder Computer mit WLAN **Lastmessung EMCH** verbinden
3) Passwort **KL66-2026** eingeben (nur bei erster Verbindung)
4) Browser öffnen und Seite **192.168.4.1** aufrufen

Das WLAN bleibt während 30min aktiv und beendet nach Ablauf der Zeit die Verbindung automatisch. Das WLAN-Symbol 

beginnt 5min vor Ablauf der WLAN-Verbindung zu blinken. Soll die WLAN-Zeit verlängert werden, den Button betätigen. Die Restzeit wird automatisch auf 30min zurückgesetzt.

Kalibrierung

Nullpunkt

1) Kabine leer in der Mitte des Liftschachts positionieren
2) Im Menü «Kalibrierung», «Nullpunkt» auswählen
3) «Kabine leer?» bestätigen
4) Start mit «OK» auslösen
5) Kabine verlassen innerhalb 10s (gilt nicht für Bedienung per Webinterface)
6) Messung läuft 5s
7) Messung beendet, Nullpunkt gespeichert

Wird erneut ein Nullpunktmessung durchgeführt, wird automatisch die vorhandene Messung überschrieben.

Referenzpunkte

1) Im Menü «Kalibrierung», «Referenzpunkte» auswählen
2) gewünschtes Referenzgewicht mithilfe der Pfeiltasten eingeben
3) Kabine mit Referenzgewicht befüllen
4) Start mit «OK» auslösen
5) Kabine verlassen innerhalb 10s (gilt nicht für Bedienung per Webinterface)
6) Messung läuft 5s
7) Messung beendet, Referenzpunkt gespeichert

Sobald ein gültiger Nullpunkt und mindestens ein gültiger Referenzpunkt erfolgreich kalibriert wurde, ist in der Hauptanzeige ein kg-Wert sichtbar.

Von nun an können im Menü «Kalibrierung», «Referenzpunkte» einzelne Punkte neu kalibriert, hinzugefügt, gelöscht oder geändert werden. Es können maximal zwei Referenzpunkte gespeichert werden.

Im Menü «Kalibrierung», «Referenzpunkte», «Kalibrierdaten» werden sämtliche kalibrierte Punkte aufgelistet.

Nutzlast

Im Menü «Nutzlast» kann die analgenspezifische Nutzlast eingegeben werden. Daraus werden automatisch die Schaltpunkte «Leerlast» 5%, «Volllast» 80% und «Überlast» 110% berechnet. Diese Werte können jederzeit unabhängig der eingestellten Nutzlast im Menü «Schaltpunkte» geändert werden.

Schaltpunkte

Im Menü «Schaltpunkte» können die jeweiligen Schaltpunke überprüft oder angepasst werden. Die Schwelle 4 ist nicht abhängig der eingestellten Nutzlast. Sie lässt sich ausschliesslich manuell einstellen.

Ausgänge

Im Menü «Ausgänge» sind die Zustände der einzelnen Schaltpunkte sichtbar. Einstellungen können keine vorgenommen werden. Die vier Relais sind folgenden Ausgängen fix zugeordnet.

Relais 1	Leerlast
Relais 2	Volllast
Relais 3	Überlast
Relais 4	Schwelle 4

System

Im Menü «System», «WLAN» sind die Einstellungen des WLAN sichtbar. Einstellungen können keine vorgenommen werden.

Im Menü «System», «Werkseinstellung» kann die Werkseinstellung geladen werden. Sämtliche Parameter werden gelöscht bzw. zurückgesetzt.

Fehlerbehebung

Fehlermeldung	Ursache
Nullpunkt fehlt	kein gültiger Nullpunkt kalibriert
Sensorsignal ungültig	das Sensorsignal liefert einen Wert ausserhalb des zulässigen Bereiches. Das Signal muss zwischen 9000Hz – 21000Hz liegen.
Sensorsignal fehlt	Kein Sensorsignal vorhanden. Anschluss Sensor und Spannungsversorgung Sensor prüfen.
Messung ungültig	Die gemessene Frequenz liegt nicht im logischen Bereich. Die Messreihe muss eine logische aufsteigende oder absteigende Frequenz von Nullpunkt bis höchster Referenzpunkt aufweisen.

DATENBLATT DIGI SENS KL66

Strain Monitor Type ED21/KL66

Strain Monitor KL66 is used as a force and deformation monitoring element for all types of structures



General

As in all DIGISENS transducers, an oscillating-wire sensor is used to convert the force/load into an electrical signal. This patented element is able to deliver a signal that can be directly processed by a computer.

Application

Surveying the stress of any kind of structure like bridges, cranes, machines or tanks. Overload protection for elevators, platform, robots, vehicles, etc.

Description

The Strain Monitor KL66 is threaded on the structure to be surveyed and allows a precise and reproducible measurement of its stress changes. Using DIGISENS vibrating wire technology instead of a strain gauge, means having a simple mechanical mounting combined with a very accurate measurement.
This technology also offers an extremely high resolution.
Deformations of fractions of a µm can be measured.
Since the KL66 is adapted to the material of the structure to be surveyed, differential thermal expansion has no negative influence on the precision.

The DIGISENS technology is also standing for a very good long-term stability. Since no organic material is involved in the measurement chain, creeping or other influences are reduced to the minimum.

The KL66 delivers a 5V-TTL frequency signal, proportional to the displacement measured. The frequency is a square root function of the displacement. In most applications it can be considered linear.
This frequency signal is easy to transmit, immune to perturbations and can be treated directly by any processor.

Fit and function

The Strain Monitor KL66 is delivered with all fixing parts needed. This allows a simple mounting on the desired structure.

No special tooling is needed. No surface conditioning, no glues drying in clean room condition. No maintenance is needed.

Just tighten the screw and you are ready to measure.

S018E-20 / 09.2023

Quelle: www.digisens.ch

Strain Monitor Type ED21/KL66

Technical Data

1. Technical specification

Dimensions LxWxH	79x53x17.5 mm
Weight (without cable)	20 g
Housing	IP53[1] according IEC 60529:2001



orientation for IP53

Power supply	3-5 VDC (opt. 24 V)

Requirements on the power supply unit:
· Class PS2 as per IEC 62368-1 = or = Limited Power Source (LPS) as per IEC 60950-1
· Short-circuit current: < 8 A
· For devices with UL certification: NEC Class 2

Nominal	5 mA (max.10 mA)

Overvoltages (UL-Standard):
Transient overvoltages according Installation Categories I
For mains supply the min. category is II

Elongation nominal	+90 / -45 µm
Elongation overload	+135 / -120 µm
Traction nominal	+60 / -30 N
Traction overload	+90 / -80 N
Signal nominal	12000-18000 Hz (5 V TTL)
Signal overload	9000-21000 Hz (5 V TTL)
Base frequency	16500 Hz ±500 Hz
Sensitivity	~4 Hz / µε @ 12 kHz ~2 Hz / µε @ 18 kHz
MTBF	13'000'000 h
Functional temperature range	-10 to +70°C

Temperature drift of zero on steel	typical ±0.25 Hz/K
Recommended mounting distance on steel (ex. S235, E295)	64.8mm
Temperature mounting distance dependency	-0.5 Hz/(K·mm)
Temperature influence on span	typical 0.1%/10°K
Vibration sensitivity	According to ICE 68-2-34
Shock resistance	According to ICE 68-2-34
Hysteresis (for ideal structure)	= 2 f.s.d. Hz[2]
Reproducibility (for ideal structure)	= 2 f.s.d. Hz[2]
Relative Air Humidity	≤98% not condensing
Pollution degree	2
Indoor use	

2. Cable

Type	AWM 2464 AWG 26 shielded or AWM 2464 AWG 26 unshielded or AWG 26 (replacement)
Length	6 m or 8.5m or 35 mm (replacement)

Cable Connection

	open	JST-PH3	Wago 231-103	JST-ZMR-03
GND	wh	1	2	1
VCC	bn	3	3	2
frequ	gn	2	1	3

Bending radius	15x diameter of cable

3. Standards

residential: EN 61000-6-1 and -3
industrial: EN 61000-6-2 and -4
elevator: EN 12015 and EN12016

Standards for ED21/KL66 (10.037840.3, 10.038747.0, 10.037127.1) (UL-certified)

Power Supply[3]: 3-5 VDC max 10mA

USR: UL 61010-1 Second Edition
CNR: CAN/CSA-C22.2 No. 61010-1 Second Edition: E313793

4. Scope of Delivery

Clip for earthing
Fixing screw 3pcs DIN912-M3x6
Fitting instruction
Shrinking tube (replacement only)

If the equipment is used in a manner not specified by the manufacturer, the protection provided by the equipment may be impaired

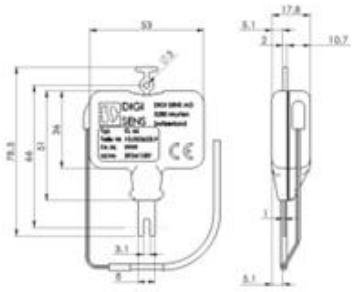
[1] Info evaluated by UL
[2] full scale deviation
[3] The device is intended to be supplied by an Isolated Limited Energy Source per UL61010-1 or Limited Power Source per UL60950-1/UL62368-1 or Class 2 per NEC

S018E-20 / 09.2023

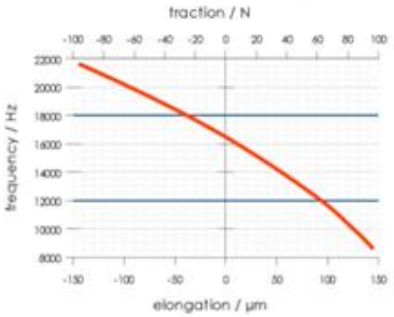
Quelle: www.digisens.ch

Strain Monitor Type ED21/KL66

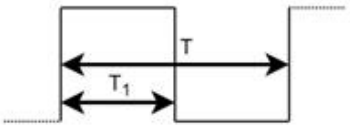
Dimensional drawing



Characteristic (typical)



Output signal



DutyCycle = T_1/T

f = 1/T

duty cycle:	*50 % +- 5 %*
frequency:	*9000 Hz to 21000Hz*
amplitude:	*input voltage - 0.2 V*

DIGI SENS Switzerland AG
Freiburgstrasse 65
CH – 3280 Murten
Switzerland
Tel. : +41 (0)26 672 98 76
Fax : +41 (0)26 672 98 79
sales@digisens.ch
www.digisens.ch

S018E-20 / 09.2023

Quelle: www.digisens.ch

MONTAGEANLEITUNG DIGI SENS KL66

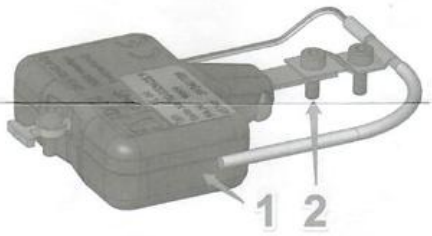
Fitting instruction for load cell type ED21/KL66

First installation

Part No.	10.032625.9	10.037840.3	10.038747.0	10.033953.4	10.036003.5	10.034919.7	10.039929.3
Ident. No.	59341189	59341188	60001555	59377809	59361898	59385856	60001690
	5V	3-5V /UL 6m	3-5V / UL 8.5m	5V	5V / PH	24V / WAGO	3-5V / UL 12.5m
Housing	Black	Black	Black	Black	Black	Red	Black
Shield	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓

Replacement

Part No.	10.037127.1	10.038833.6	10.037128.2	10.037129.3
Ident. No.:	59385871	60001552	59385873	59385872
	5V / UL	5V	5V	24V / WAGO
Housing:	Black	Black	Black	Red
Shield:	✓	✓	✓	×



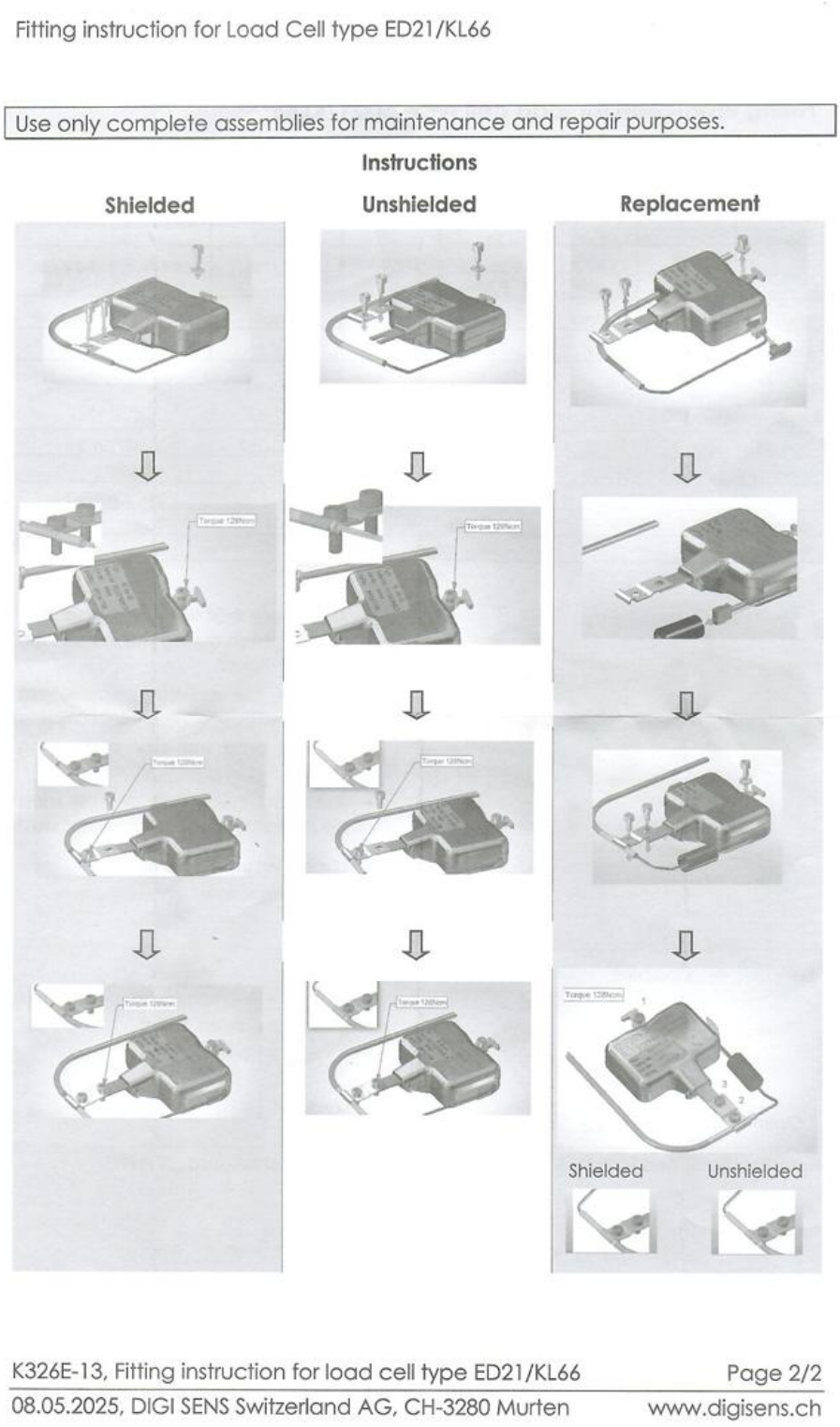
- → Make sure that the adjusting screw is not tighten during the installation and transport
- → Tighten the adjusting screw just before executing the calibration
- → Do not drop the load measuring device.
- → The load measuring device must be protected against metallic dust

1. Load measuring device
2. Adjusting screw

Sensor's end cable:				
				=> white: ground => green: signal => brown: power
Open ends	JST PHR-3	WAGO	JST ZMR-3 Replacement	

Note: For UL certified ED21/KL66 (10.037840.3 & 10.038747.0) must be used JST PHR-3

Quelle: www.digisens.ch


Fitting instruction for Load Cell type ED21/KL66

Use only complete assemblies for maintenance and repair purposes.

Instructions

Shielded | Unshielded | Replacement

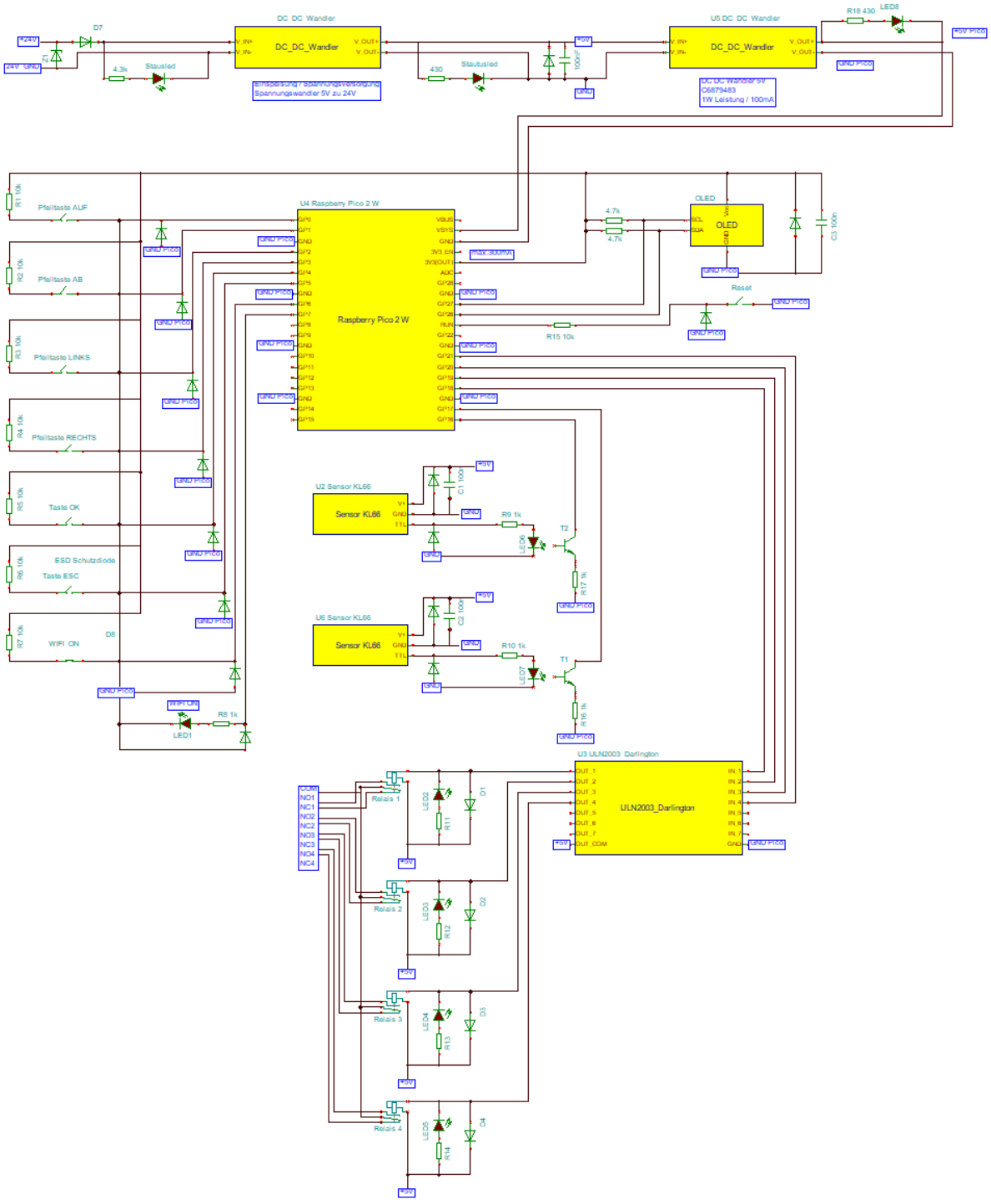
Shielded Unshielded

K326E-13, Fitting instruction for load cell type ED21/KL66 Page 2/2

08.05.2025, DIGI SENS Switzerland AG, CH-3280 Murten www.digisens.ch

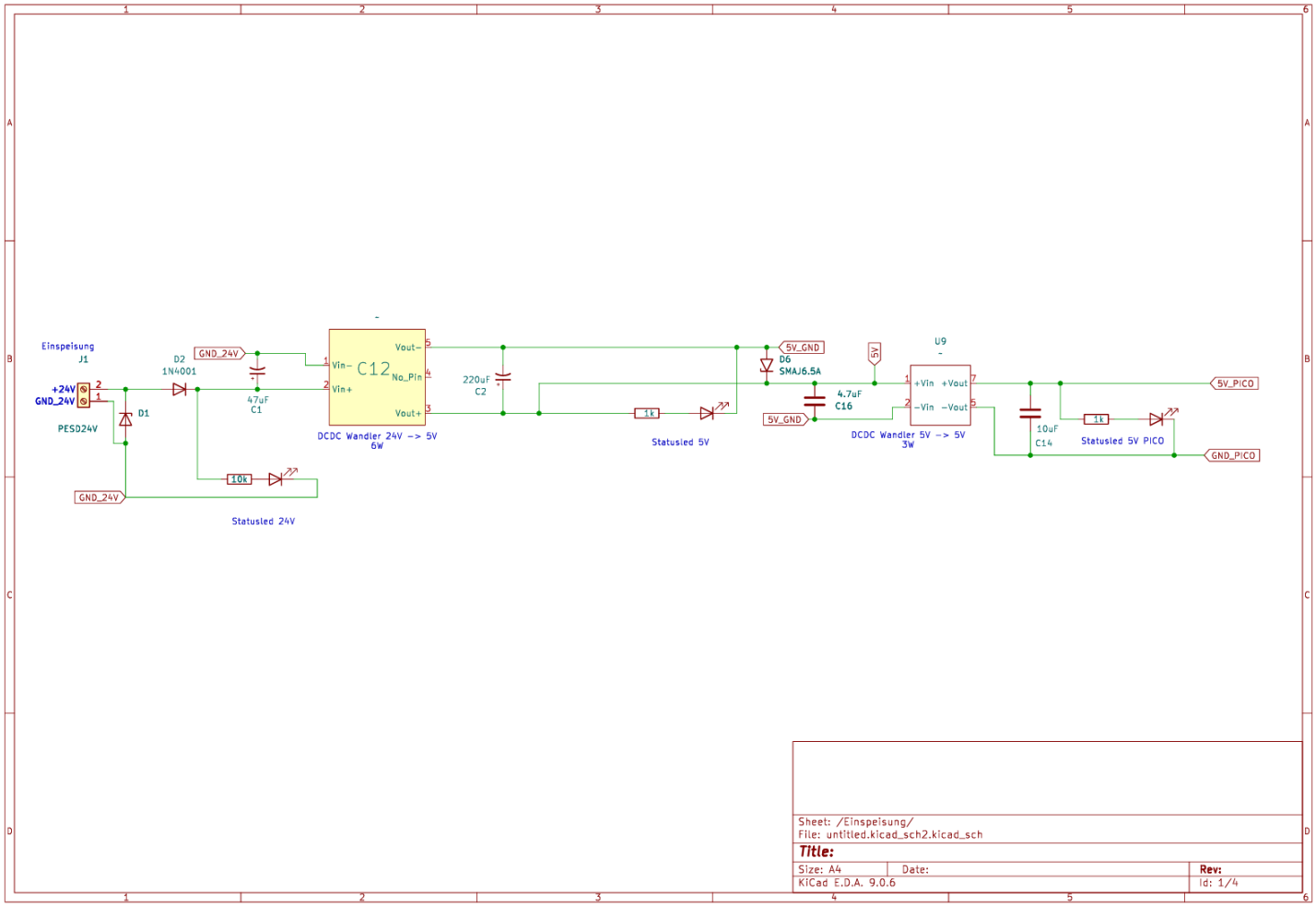
Quelle: www.digisens.ch

SCHEMA TINA TI

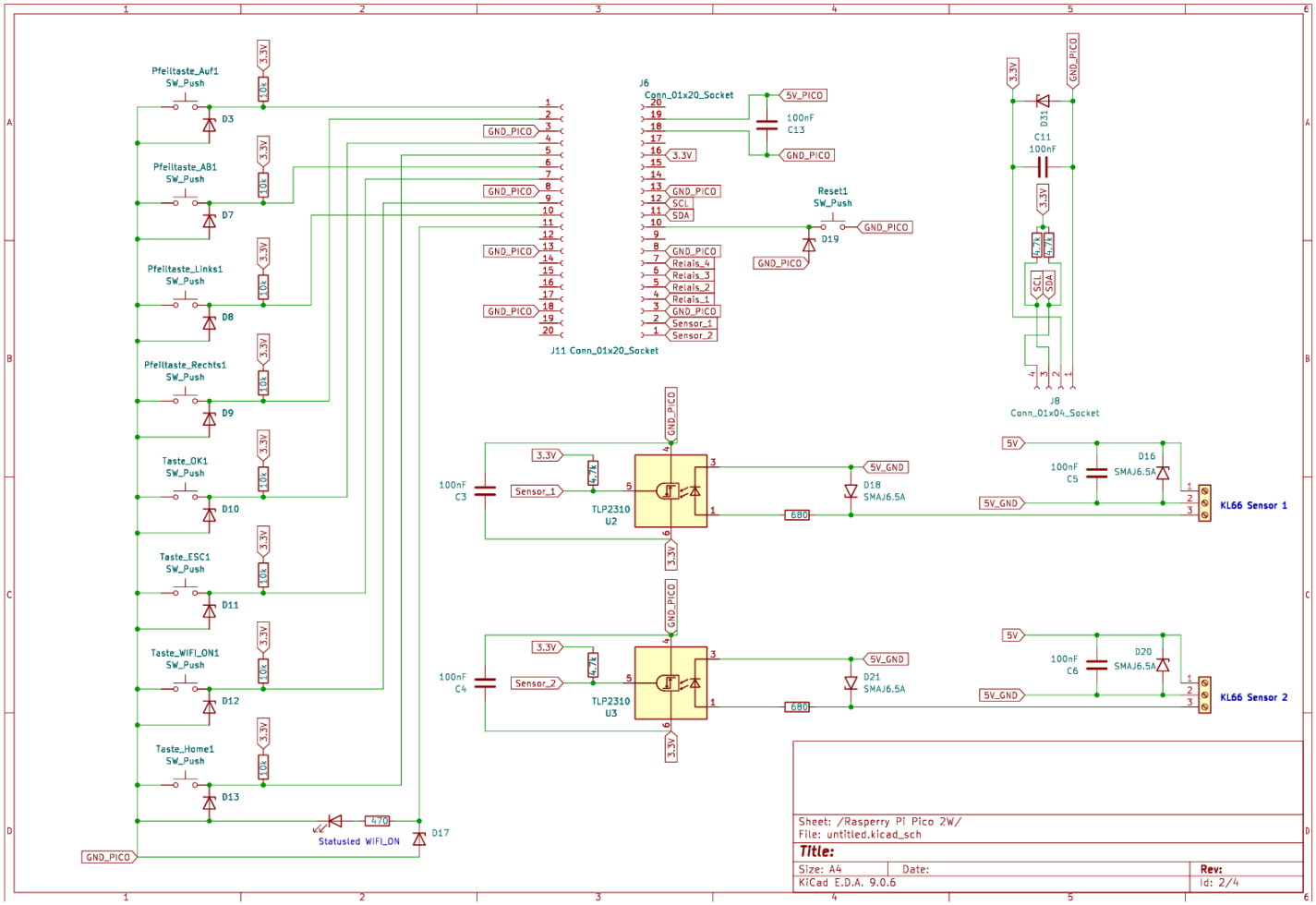


Quelle: TINA-TI

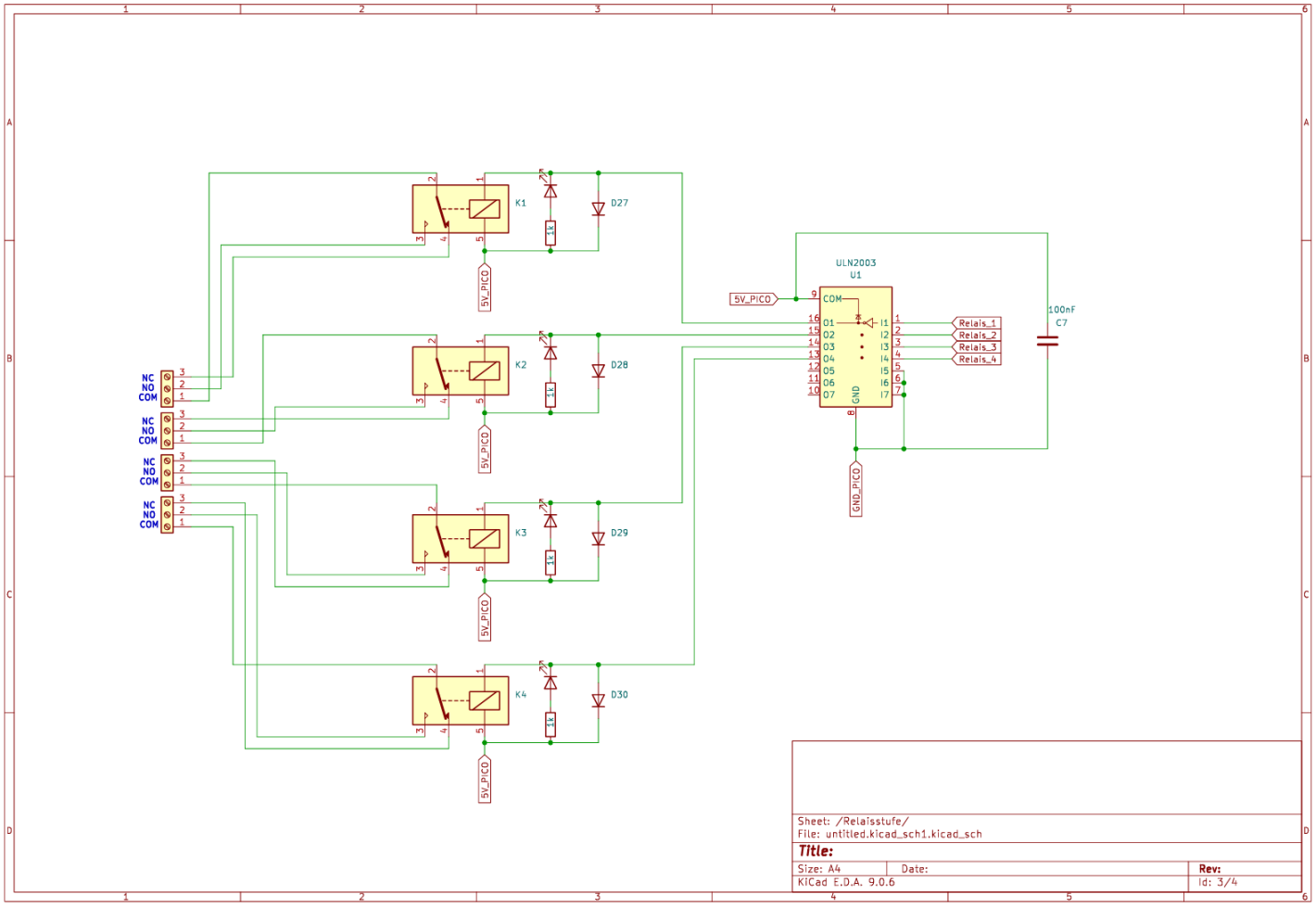
SCHEMA KI-CAD



Quelle: KiCad



Quelle: KiCad

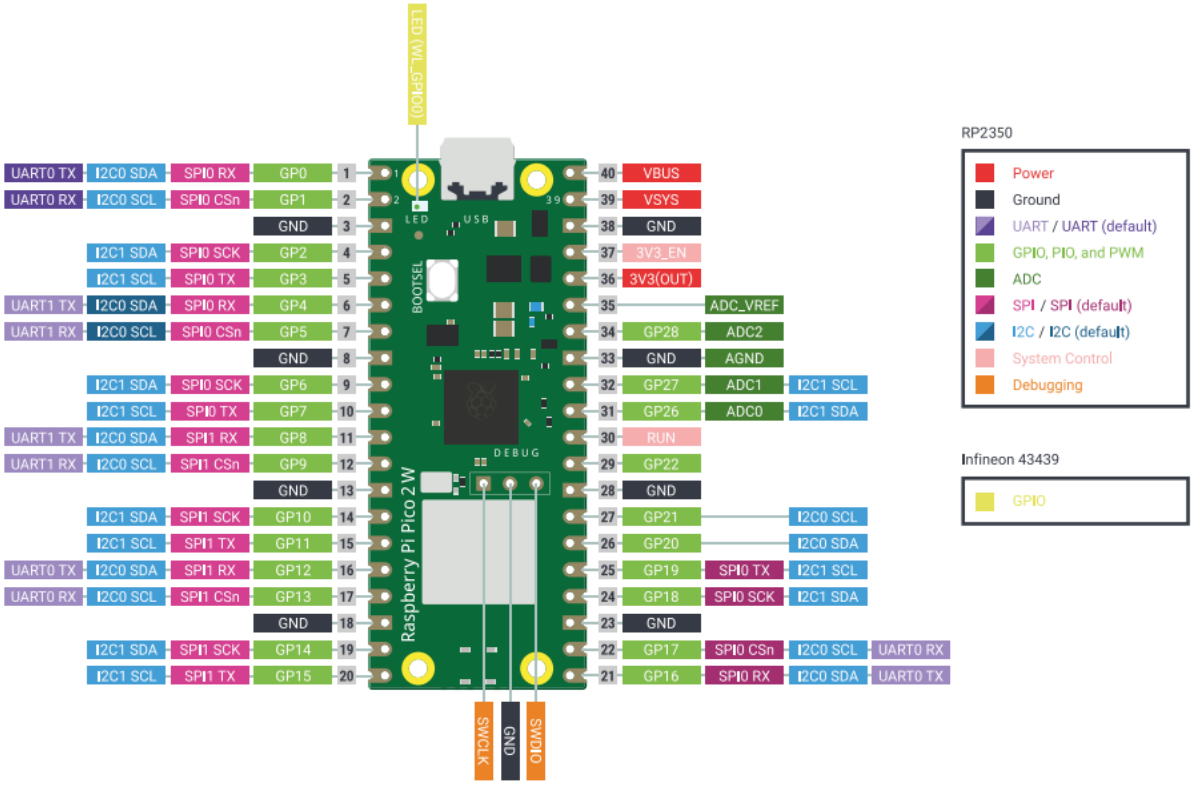


Quelle: KiCad

PINBELEGUNG RASPBERRY PI PICO 2W

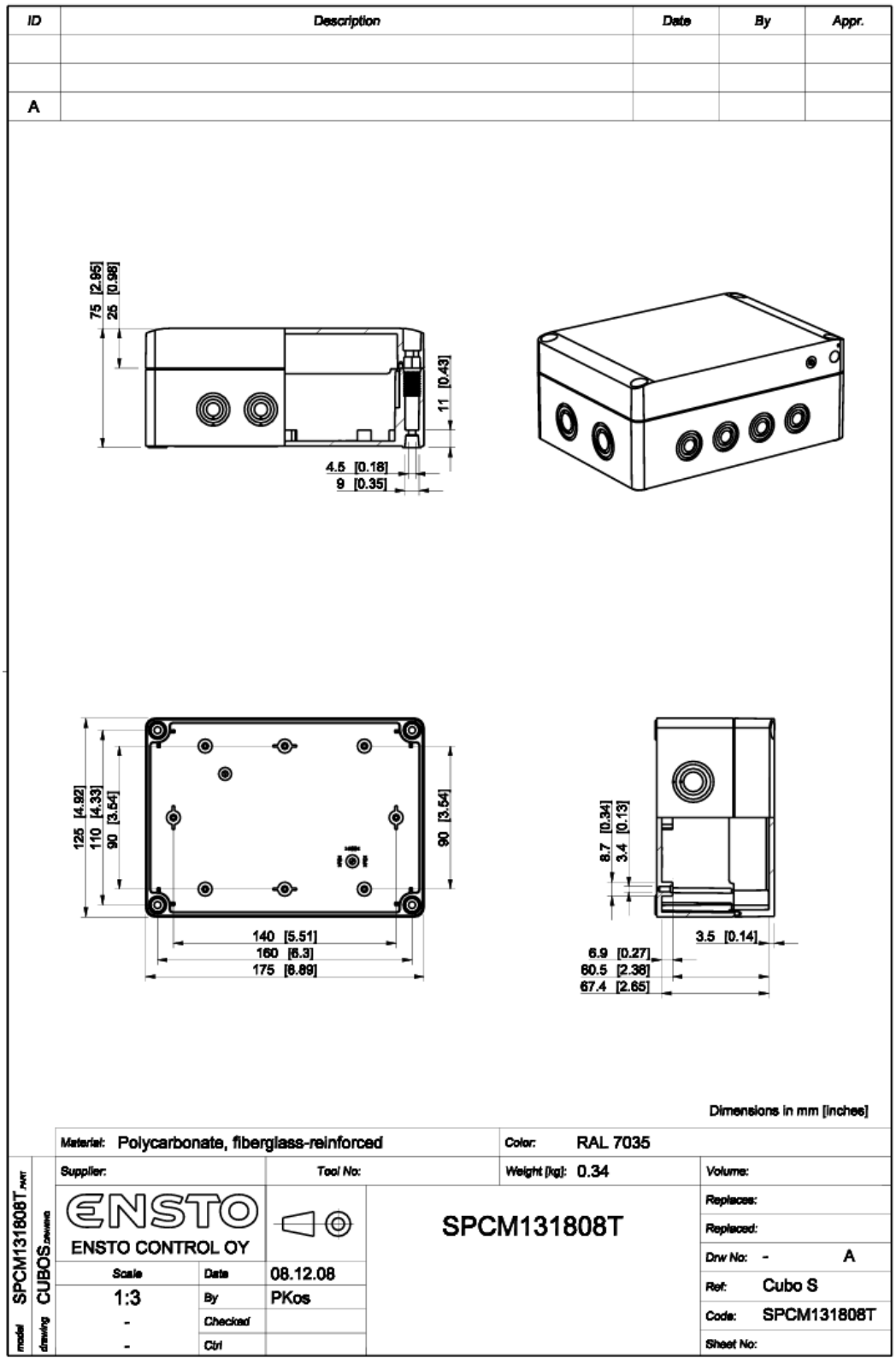
PIN	Bezeichnung	Angeschlossene Komponente
1	GP0	Taster AUF
2	GP1	Taster RECHTS
3		GND
4	GP2	Taster OK
5	GP3	Taster HOME
6	GP4	Taster AB
7	GP5	Taster ESC
8		GND
9	GP6	Taster WIFI
10	GP7	Taster LINKS
11	GP8	WLAN Statusled
12	GP9	-
13		GND
14	GP10	-
15	GP11	-
16	GP12	-
17	GP13	-
18		GND
19	GP14	-
20	GP15	-
21	GP16	KL66 Sensor
22	GP17	KL66 Sensor
23		GND
24	GP18	Relais 1
25	GP19	Relais 2
26	GP20	Relais 3
27	GP21	Relais 4
28		GND
29	GP22	-
30	RUN	Taster RESET
31	GP26	SDA Display
32	GP27	SCL Display
33		GND
34	GP28	-
35	ADC_VREF	-

PIN	Bezeichnung	Angeschlossene Komponente
36	3V3 (OUT)	3.3VDC Speisungsausgang
37	3V3_EN	-
38	GND	
39	VSYS	Einspeisung 5VDC
40	VBUS	-



Quelle: Datenblatt Raspberry Pi Pico 2W

DATENBLATT GEHÄUSE



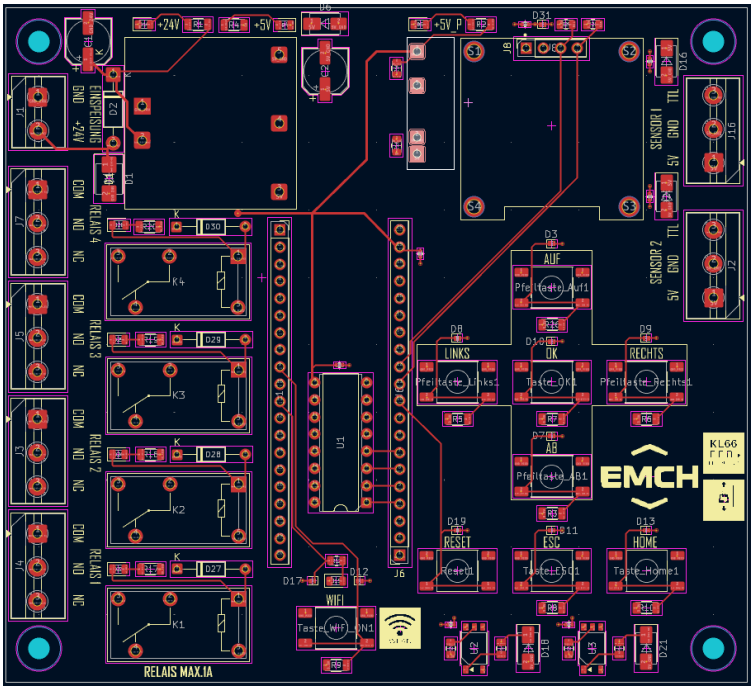
Quelle: www.swibox.ch

BAUTEILE PCB

Bauteil	Bauteilnummer	Anzahl	Bezugsort
Kondensator 100nF	C1525	7	JLCPCB
Widerstand 10kΩ	C1489	9	JLCPCB
Kondensator 10µF	C1713	1	JLCPCB
Diode 1N4001	C2456	1	JLCPCB
Widerstand 1kΩ	C1469	6	JLCPCB
Elektrolytkondensator 220µF	C3342	1	JLCPCB
Widerstand 4,7kΩ	C17673	4	JLCPCB
Kondensator 4,7µF	C1779	1	JLCPCB
Widerstand 470Ω	C17710	1	JLCPCB
Elektrolytkondensator 47µF	C3349	1	JLCPCB
Widerstand 680Ω	C17798	2	JLCPCB
Buchsenleiste 1×4, 2,54mm	C124413	1	JLCPCB
Buchsenleiste 1×20, 2,54mm	C25503124	2	JLCPCB
Diode DO-35	C5444762	4	JLCPCB
Relais G5Q-1	C397241	4	JLCPCB
Grüne LED 0805	C84257	8	JLCPCB
24V Schutzdiode PESD24V	C83851	1	JLCPCB
3,3V ESD-Schutzdiode PESD3V3S1UL	C282557	11	JLCPCB
TVS Diode SMAJ6.5A	C123817	5	JLCPCB
Taster	C7470157	9	JLCPCB
Schraubklemme 2-polig, 5,00mm	C8269	1	JLCPCB
Schraubklemme 3-polig, 5,00mm	C8270	6	JLCPCB
Optokoppler TLP2310	C7473281	2	JLCPCB
Darlington-Treiber ULN2003	C93000	1	JLCPCB
DC/DC-Wandler	C341504	1	JLCPCB
DC/DC-Wandler	C5369564	1	JLCPCB
Raspberry Pi Pico 2WH	SC1634	1	Reichelt Elektronik
OLED-Display SSD1306	SBC-OLED01	1	Reichelt Elektronik

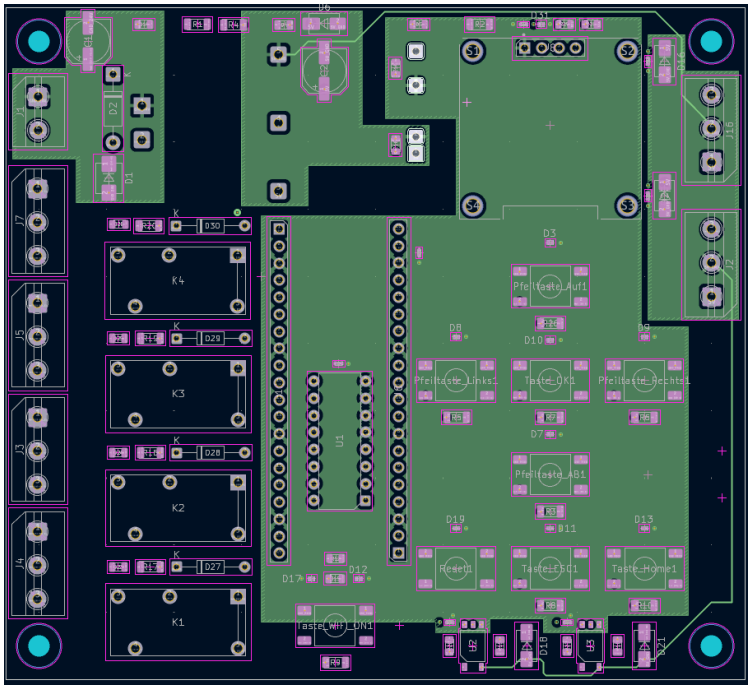
2D ANSICHT PCB LAGEN

Toplayer



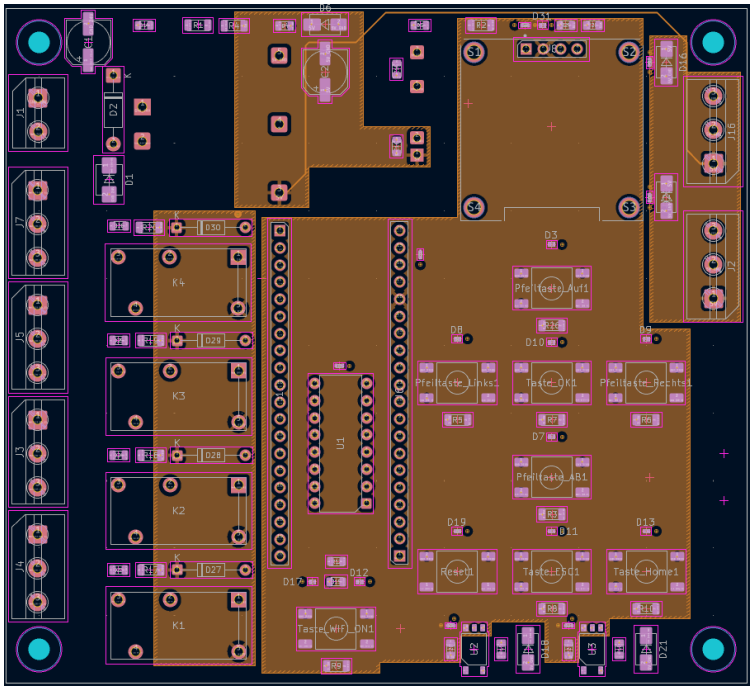
Quelle: KiCad

Layer 2 (GND)



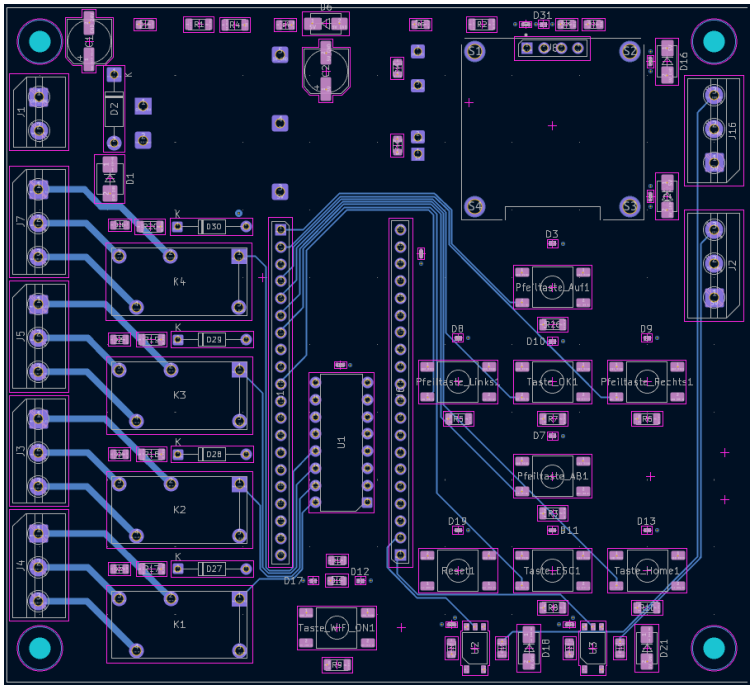
Quelle: KiCad

Layer 3 (V+)



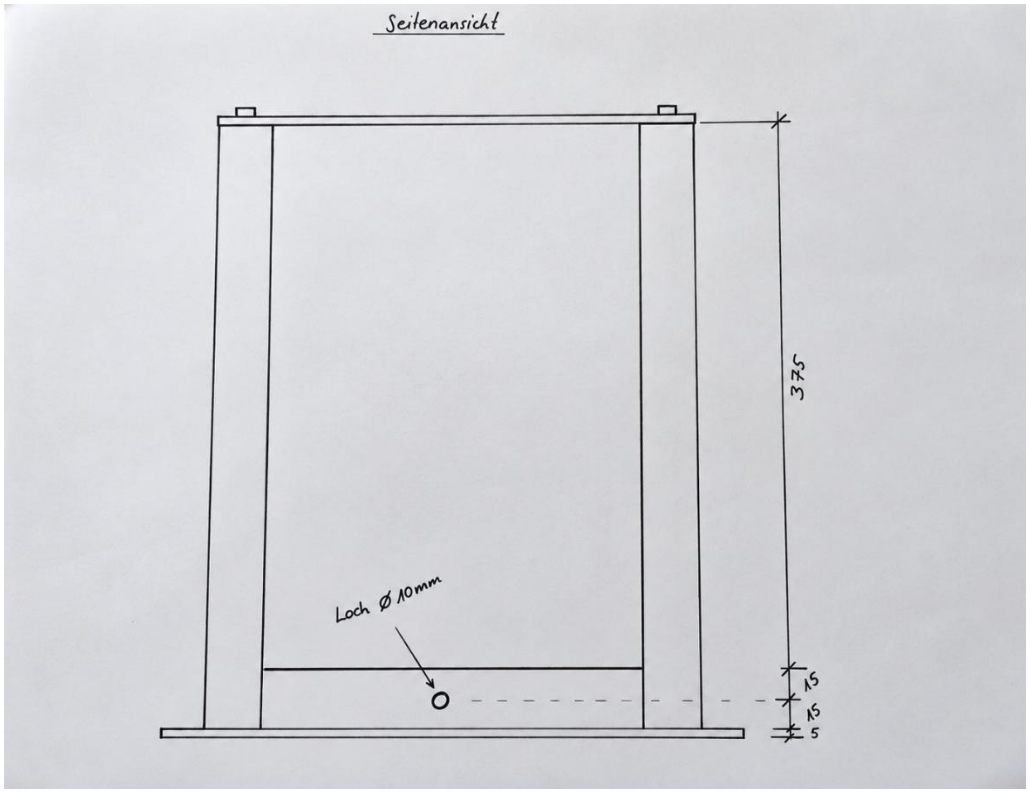
Quelle: KiCad

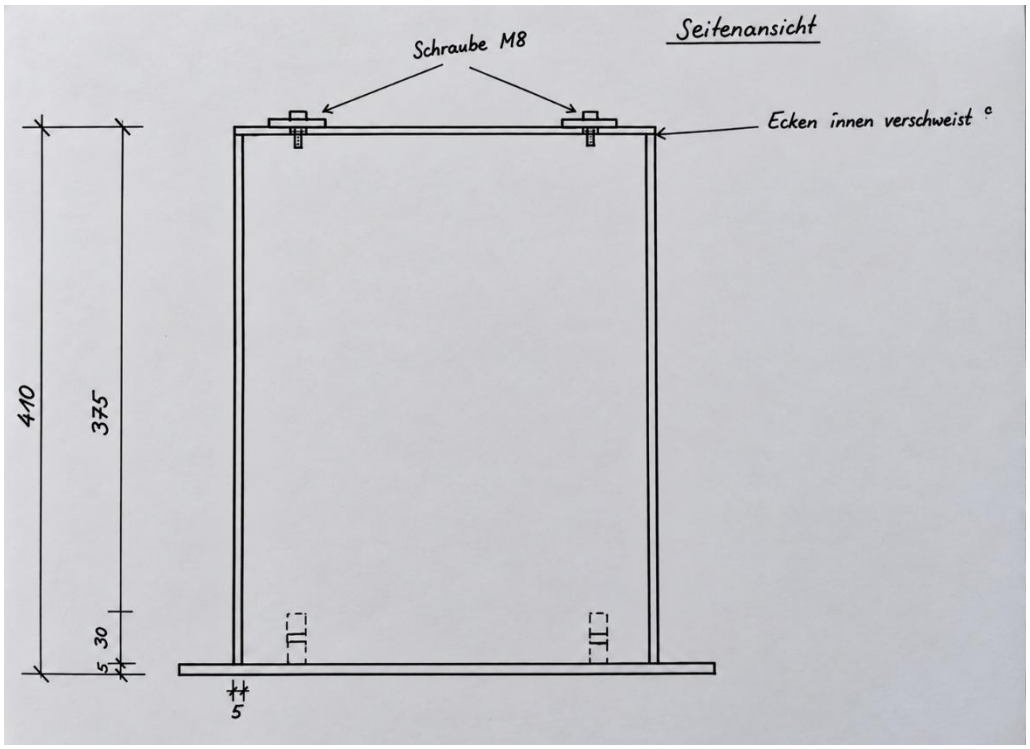
Bottomlayer

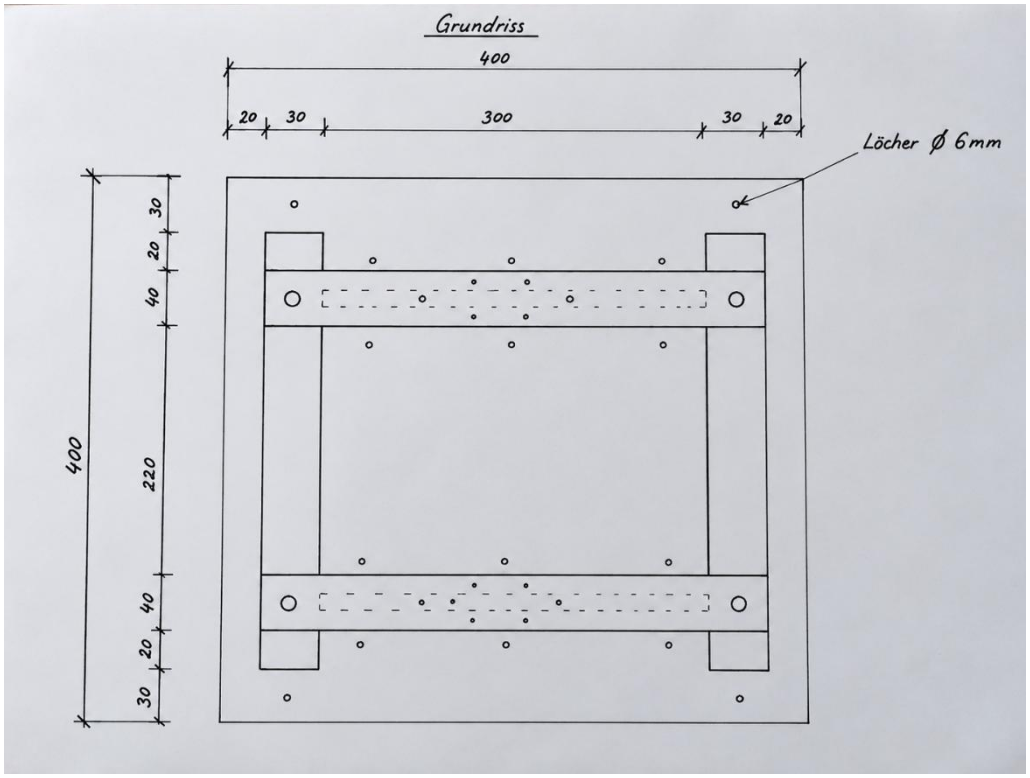


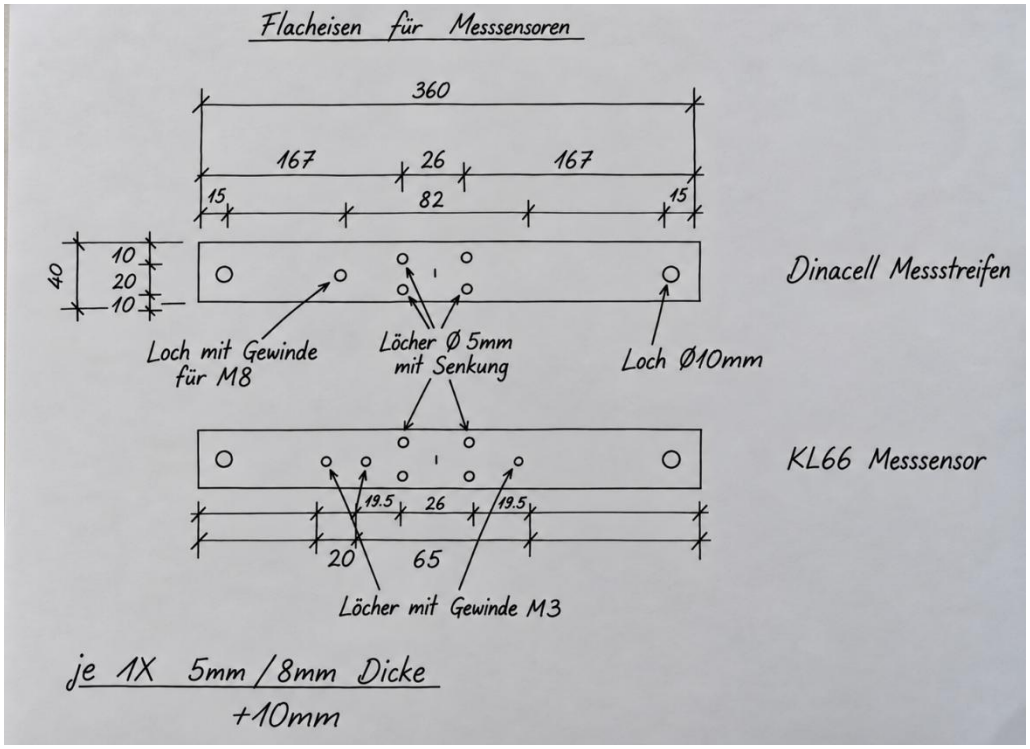
Quelle: KiCad

MASSSKIZZEN TESTAUFBAU

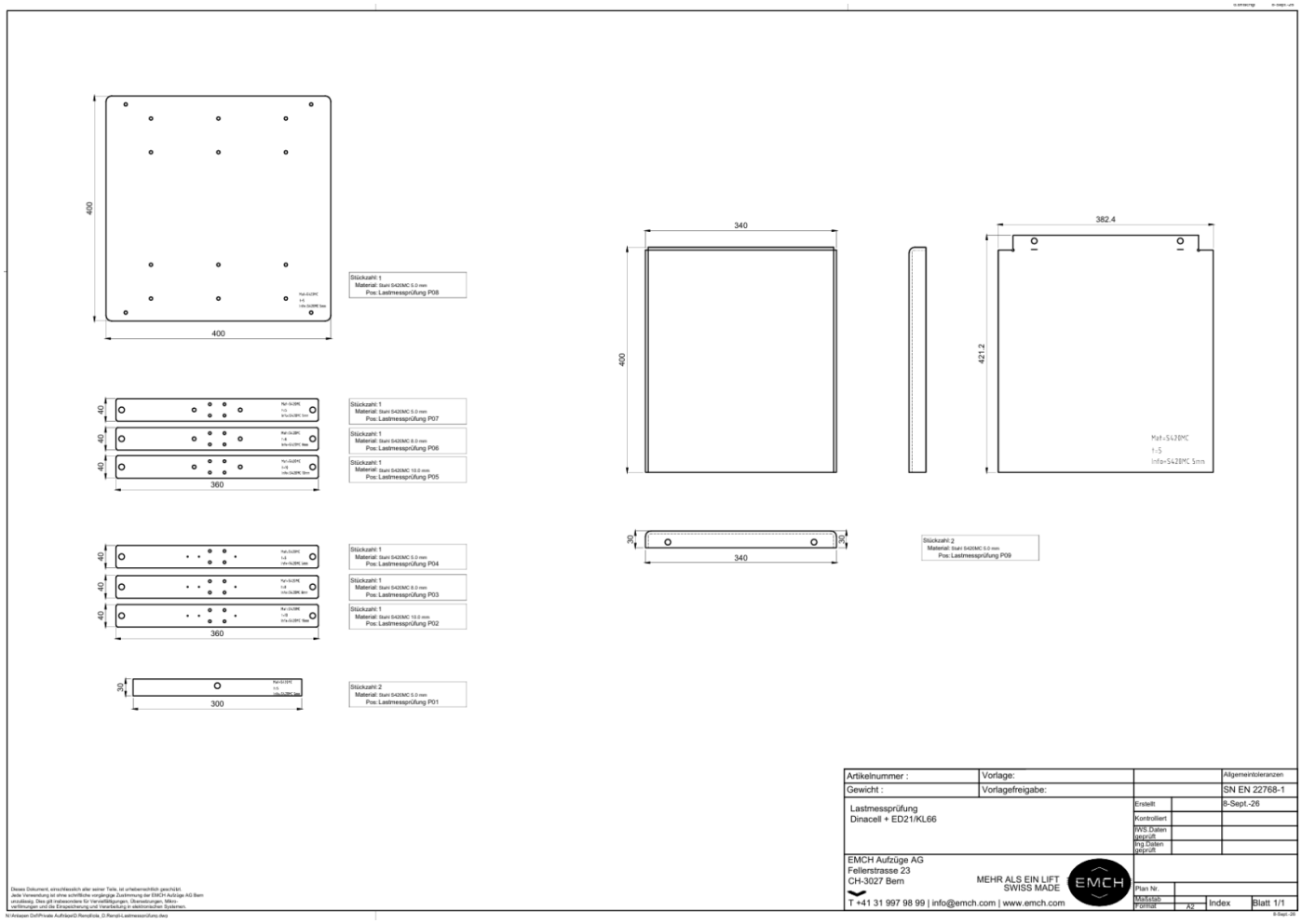




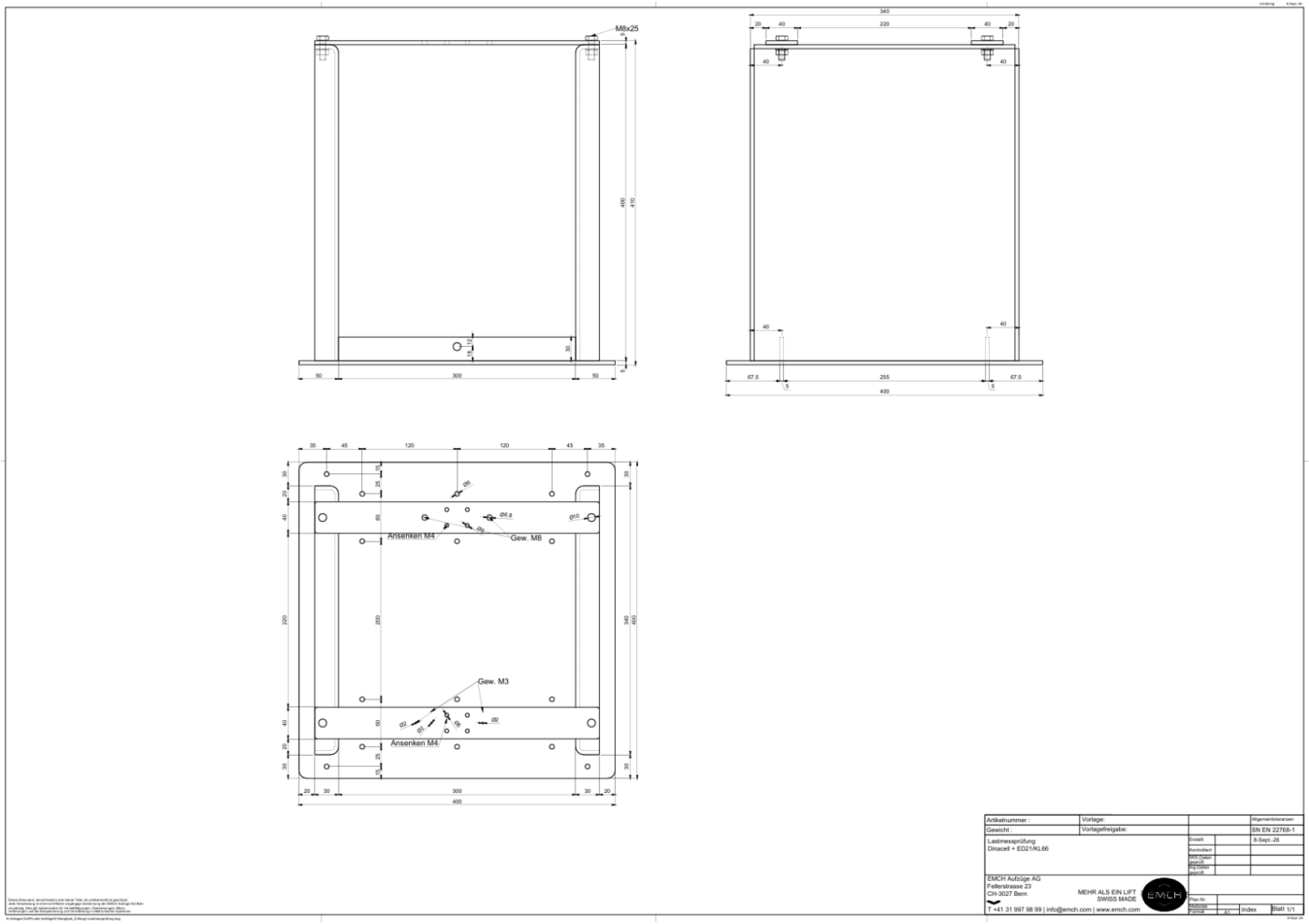

Grundriss
400
20
30
300
30
20
Löcher Ø 6mm
400
30
20
40
220
40
20
30


Flacheisen für Messsensoren
360
167
26
167
15
82
15
40
10
20
10
Dinacell Messstreifen
Loch mit Gewinde für M8
Löcher Ø 5mm mit Senkung
Loch Ø10mm
KL66 Messsensor
19.5
26
19.5
20
65
Löcher mit Gewinde M3
je 1X 5mm / 8mm Dicke
+10mm

CAD ZEICHNUNGEN



Quelle: EMCH Aufzüge AG



Quelle: EMCH Aufzüge AG

STÜCKLISTE TESTAUFBAU

Bezeichnung	Menge	Bezugsort
Lastmesssenor KL66	1	DIGI SENS AG
Metallkonstruktion geschweisst	1	EMCH Aufzüge AG
Steuerkabel 2*1mm^2	1m	EMCH Aufzüge AG
Gehäuse 250*175*150mm	1	EMCH Aufzüge AG
Gehäuse Cubo S SPCM 131808T	1	EMCH Aufzüge AG
DIN Schiene 240mm	1	EMCH Aufzüge AG
Netzteil MeanWell NDR 120-24	1	EMCH Aufzüge AG
Kabelverschraubung M16	5	EMCH Aufzüge AG
Gegenmutter M16	5	EMCH Aufzüge AG
Endhalter DIN-Schiene	4	EMCH Aufzüge AG
Abstandhalter M3*30mm Kunststoff	4	EMCH Aufzüge AG
Auswerteeinheit Dinacell VK-3SV	1	EMCH Aufzüge AG
Lastmesssensor SV-3000	1	EMCH Aufzüge AG
6-kant Schraube M8*25mm	4	EMCH Aufzüge AG
U-Scheibe M8	4	EMCH Aufzüge AG
Rip-Block Scheibe M8	4	EMCH Aufzüge AG
6-kant Mutter M8	4	EMCH Aufzüge AG
Senkkopf Inbus M4*16	16	EMCH Aufzüge AG
Senkkopf Inbus M4*20	8	EMCH Aufzüge AG
Rip-Block Scheibe M4	24	EMCH Aufzüge AG
6-kant Mutter M4	28	EMCH Aufzüge AG
Zylinderkopfschraube M4*16	8	EMCH Aufzüge AG
Zylinderkopfschraube M3*12	8	EMCH Aufzüge AG
Senkkopfholzschraube 4*25mm	16	EMCH Aufzüge AG
Cuvette M5	16	EMCH Aufzüge AG
Ringkabelschuh M6 1mm^2	1	EMCH Aufzüge AG
Aderendhülse 1mm^2	6	EMCH Aufzüge AG
Aderendhülse 2.5mm^2	4	EMCH Aufzüge AG
Hängewaage Voltcraft HS-100	2	Galaxus Onlineshop
Holzplatte 400*400*19mm	1	Hornbach Baumarkt
Wantenspanner 8mm A4 Edelstahl	2	Hornbach Baumarkt
Öse auf Platte V4A 40*35mm	6	Hornbach Baumarkt
Schäkel 6mm geschweift A4 Edelstahl	2	Hornbach Baumarkt
Anschlusskabel 3*1mm^2	3m	Hornbach Baumarkt
PE Draht 1mm^2	1m	Hornbach Baumarkt
Zylinderkopfschraube M3*16	2	Hornbach Baumarkt
Auswerteeinheit KL66	1	Prototyp Eigenbau

MESSDATEN TESTPHASE 1

2-Punkte-Kalibrierung KL66

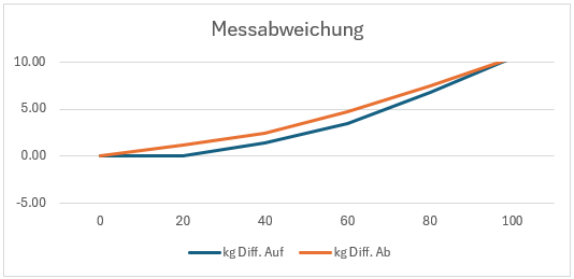
Nullpunkt kalibriert bei 17222Hz

Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1
Referenzpunkt 2

20kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17222.00	0.00	0.00	0.00	17222.00	0.00	
20	20.00	0.00	17569.00	347.00	21.20	1.20	17587.00	365.00	
40	41.40	1.40	17910.00	341.00	42.40	2.40	17934.00	347.00	
60	63.50	3.50	18253.00	343.00	64.70	4.70	18270.00	336.00	
80	86.80	6.80	18588.00	335.00	87.50	7.50	18601.00	331.00	
100	110.50	10.50	18917.00	329.00	110.50	10.50	18921.00	320.00	
ø Messabweichung		2.22				2.63			2.43

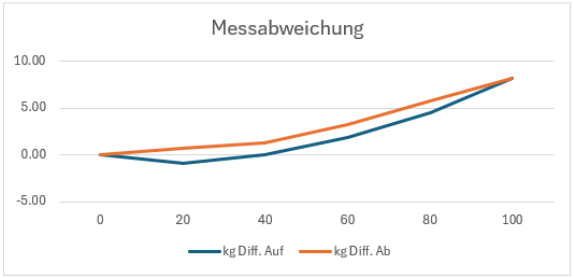


Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1
Referenzpunkt 2

40kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17217.00	-5.00	0.00	0.00	17222.00	0.00	
20	19.10	-0.90	17561.00	344.00	20.70	0.70	17584.00	362.00	
40	40.00	0.00	17909.00	348.00	41.30	1.30	17925.00	341.00	
60	61.90	1.90	18245.00	336.00	63.20	3.20	18266.00	341.00	
80	84.50	4.50	18582.00	337.00	85.80	5.80	18595.00	329.00	
100	108.20	8.20	18913.00	331.00	108.20	8.20	18912.00	317.00	
ø Messabweichung		1.55				1.92			1.74

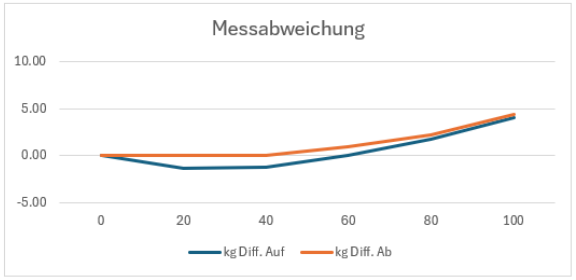


Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1
Referenzpunkt 2

60kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts			
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	17223.00	1.00	0.00	0.00	17223.00	1.00
20	18.70	-1.30	17563.00	340.00	20.00	0.00	17585.00	362.00
40	38.80	-1.20	17909.00	346.00	40.00	0.00	17930.00	345.00
60	60.00	0.00	18250.00	341.00	61.00	1.00	18270.00	340.00
80	81.80	1.80	18585.00	335.00	82.20	2.20	18600.00	330.00
100	104.10	4.10	18913.00	328.00	104.40	4.40	18917.00	317.00
ø Messabweichung		0.84				0.76		0.80

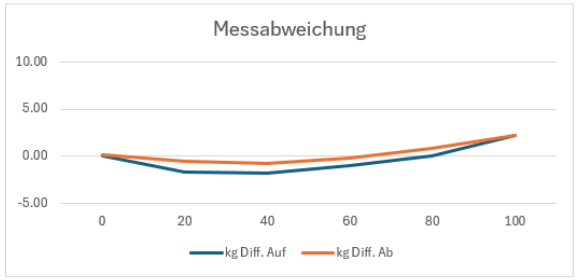


Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1
Referenzpunkt 2

80kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts			
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	17222.00	0.00	0.10	0.10	17224.00	2.00
20	18.30	-1.70	17561.00	339.00	19.50	-0.50	17585.00	361.00
40	38.20	-1.80	17910.00	349.00	39.20	-0.80	17925.00	340.00
60	59.00	-1.00	18254.00	344.00	59.80	-0.20	18266.00	341.00
80	80.00	0.00	18582.00	328.00	80.80	0.80	18596.00	330.00
100	102.20	2.20	18912.00	330.00	102.20	2.20	18912.00	316.00
ø Messabweichung		0.67				0.46		0.57

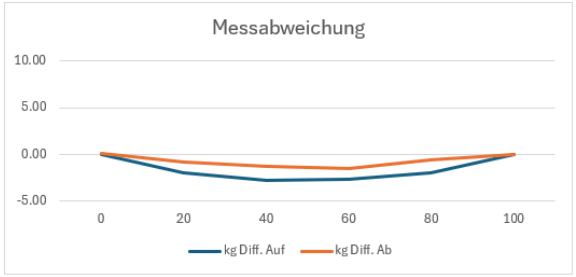


Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1
Referenzpunkt 2

100kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts			
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	17223.00	1.00	0.10	0.10	17225.00	3.00
20	18.00	-2.00	17564.00	341.00	19.20	-0.80	17588.00	363.00
40	37.20	-2.80	17906.00	342.00	38.70	-1.30	17930.00	342.00
60	57.40	-2.60	18248.00	342.00	58.50	-1.50	18266.00	336.00
80	78.00	-2.00	18580.00	332.00	79.40	-0.60	18601.00	335.00
100	100.00	0.00	18911.00	331.00	100.00	0.00	18911.00	310.00
ø Messabweichung		0.94				0.43		0.68



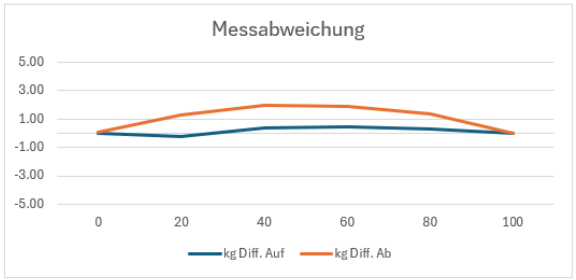
3-Punkte-Kalibrierung KL66

Nullpunkt kalibriert bei 17222Hz

Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1 20kg
Referenzpunkt 2 100kg

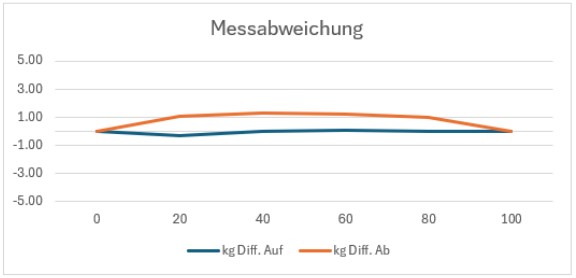
	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17215.00	-7.00	0.10	0.10	17224.00	2.00	
20	19.80	-0.20	17556.00	341.00	21.30	1.30	17583.00	359.00	
40	40.40	0.40	17905.00	349.00	42.00	2.00	17933.00	350.00	
60	60.50	0.50	18245.00	340.00	61.90	1.90	18266.00	333.00	
80	80.30	0.30	18582.00	337.00	81.40	1.40	18599.00	333.00	
100	100.00	0.00	18912.00	330.00	100.00	0.00	18911.00	312.00	
ø Messabweichung		0.14				0.67			0.41



Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1 40kg
Referenzpunkt 2 100kg

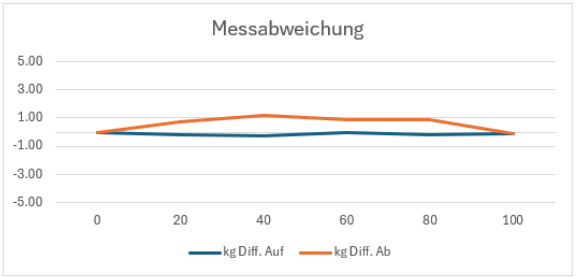
	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17221.00	-1.00	0.00	0.00	17223.00	1.00	
20	19.70	-0.30	17562.00	341.00	21.10	1.10	17586.00	363.00	
40	40.00	0.00	17906.00	344.00	41.30	1.30	17930.00	344.00	
60	60.10	0.10	18247.00	341.00	61.20	1.20	18266.00	336.00	
80	80.00	0.00	18580.00	333.00	81.00	1.00	18596.00	330.00	
100	100.00	0.00	18911.00	331.00	100.00	0.00	18913.00	317.00	
ø Messabweichung		0.04				0.46			0.25



Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1 60kg
Referenzpunkt 2 100kg

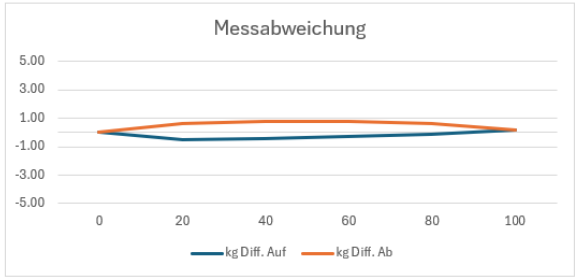
	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17222.00	0.00	0.00	0.00	17223.00	1.00	
20	19.80	-0.20	17566.00	344.00	20.70	0.70	17580.00	357.00	
40	39.70	-0.30	17906.00	340.00	41.20	1.20	17931.00	351.00	
60	60.00	0.00	18246.00	340.00	60.90	0.90	18265.00	334.00	
80	79.80	-0.20	18580.00	334.00	80.90	0.90	18598.00	333.00	
100	99.90	-0.10	18910.00	330.00	99.90	-0.10	18910.00	312.00	
ø Messabweichung		0.08				0.38			0.23



Messung KL66 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 1 80kg
Referenzpunkt 2 100kg

	Messreihe aufwärts				Messreihe abwärts				
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	Hz ist	Hz Diff.	kg ist	kg Diff. Ab	Hz ist	Hz Diff.	
0	0.00	0.00	17222.00	0.00	0.00	0.00	17223.00	1.00	
20	19.50	-0.50	17562.00	340.00	20.60	0.60	17580.00	357.00	
40	39.60	-0.40	17908.00	346.00	40.80	0.80	17927.00	347.00	
60	59.70	-0.30	18247.00	339.00	60.80	0.80	18265.00	338.00	
80	79.90	-0.10	18583.00	336.00	80.60	0.60	18595.00	330.00	
100	100.20	0.20	18914.00	331.00	100.20	0.20	18915.00	320.00	
ø Messabweichung		0.15				0.30			0.22

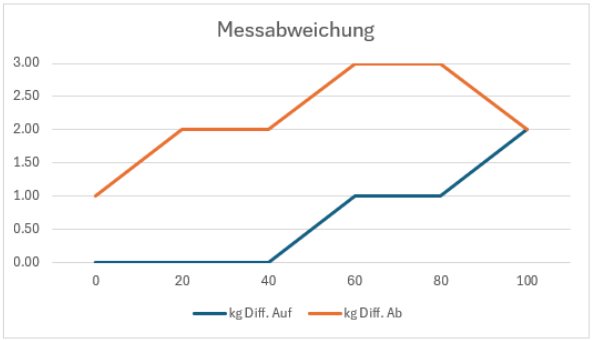


2-Punkte-Kalibrierung Dinacell SV-3000

Messung Dinacell SV-3000 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 20kg

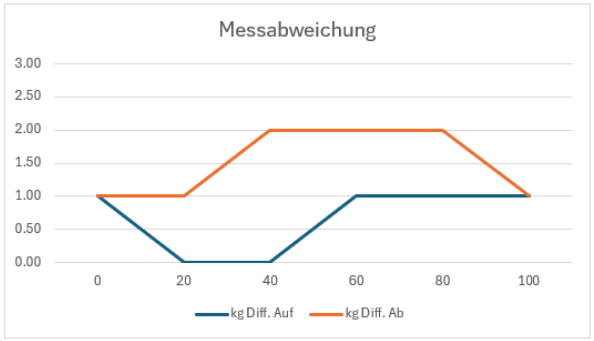
	Messreihe aufwärts		Messreihe abwärts		
kg soll	**kg ist**	**kg Diff. Auf**	**kg ist**	**kg Diff. Ab**	
0	0.00	0.00	1.00	1.00	
20	20.00	0.00	22.00	2.00	
40	40.00	0.00	42.00	2.00	
60	61.00	1.00	63.00	3.00	
80	81.00	1.00	83.00	3.00	
100	102.00	2.00	102.00	2.00	
ø Messabweichung		0.25		1.63	0.94



Messung Dinacell SV-3000 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 40kg

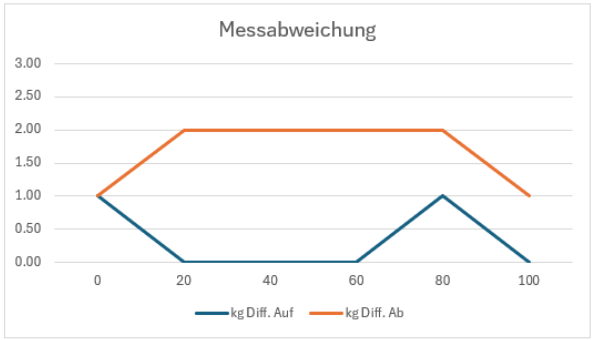
	Messreihe aufwärts		Messreihe abwärts		
kg soll	**kg ist**	**kg Diff. Auf**	**kg ist**	**kg Diff. Ab**	
0	1.00	1.00	1.00	1.00	
20	20.00	0.00	21.00	1.00	
40	40.00	0.00	42.00	2.00	
60	61.00	1.00	62.00	2.00	
80	81.00	1.00	82.00	2.00	
100	101.00	1.00	101.00	1.00	
ø Messabweichung		0.38		1.13	0.75



Messung Dinacell SV-3000 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 60kg

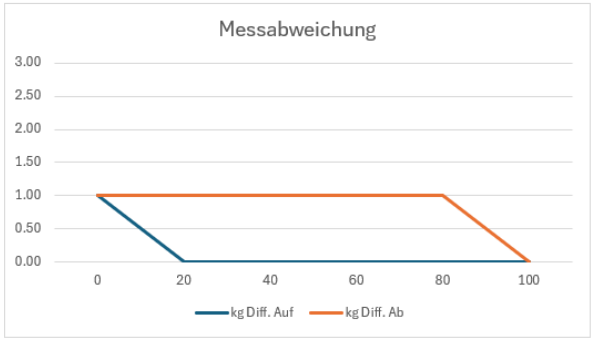
	Messreihe aufwärts		Messreihe abwärts	
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	kg ist	kg Diff. Ab
0	1.00	1.00	1.00	1.00
20	20.00	0.00	22.00	2.00
40	40.00	0.00	42.00	2.00
60	60.00	0.00	62.00	2.00
80	81.00	1.00	82.00	2.00
100	100.00	0.00	101.00	1.00
ø Messabweichung		0.25		1.25	0.75



Messung Dinacell SV-3000 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 80kg

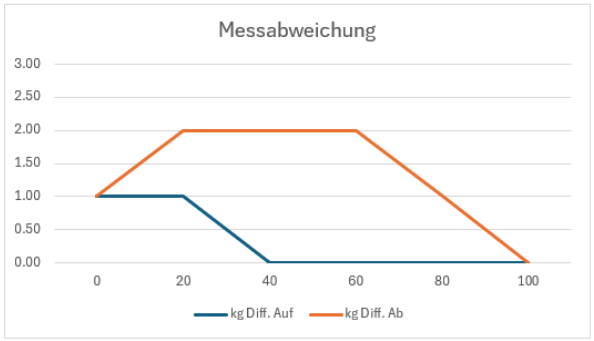
	Messreihe aufwärts		Messreihe abwärts	
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	kg ist	kg Diff. Ab
0	1.00	1.00	1.00	1.00
20	20.00	0.00	21.00	1.00
40	40.00	0.00	41.00	1.00
60	60.00	0.00	61.00	1.00
80	80.00	0.00	81.00	1.00
100	100.00	0.00	100.00	0.00
ø Messabweichung		0.13		0.63	0.38



Messung Dinacell SV-3000 10mm Flacheisen

Referenzpunkt 100kg

	Messreihe aufwärts		Messreihe abwärts	
kg soll	kg ist	kg Diff. Auf	kg ist	kg Diff. Ab
0	1.00	1.00	1.00	1.00
20	21.00	1.00	22.00	2.00
40	40.00	0.00	42.00	2.00
60	60.00	0.00	62.00	2.00
80	80.00	0.00	81.00	1.00
100	100.00	0.00	100.00	0.00
ø Messabweichung		0.25		1.00	0.63



MESSDATEN TESTPHASE 2

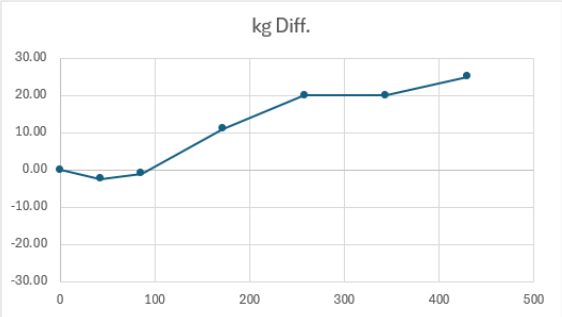
2-Punkte-Kalibrierung KL66

Nullpunkt kalibriert bei 15281 Hz

Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 86kg
Referenzpunkt 2

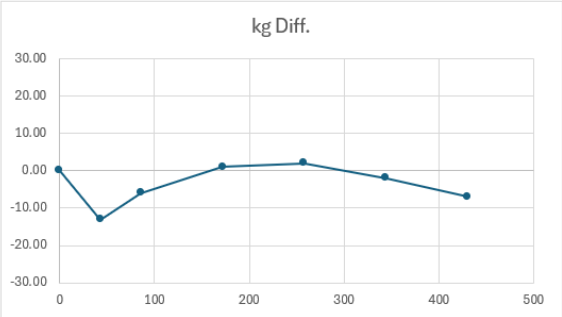
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15287.00	6.00
43	40.60	-2.40	15256.00	-31.00
86	85.00	-1.00	15229.00	-27.00
172	183.00	11.00	15168.00	-61.00
258	278.00	20.00	15110.00	-58.00
344	364.00	20.00	15059.00	-51.00
430	455.00	25.00	15004.00	-55.00
ø Messabweichung		7.94		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 172kg
Referenzpunkt 2

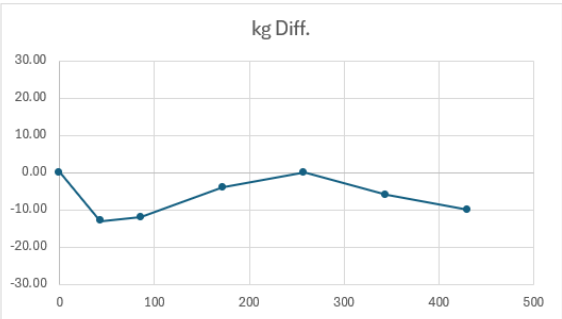
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15288.00	7.00
43	30.00	-13.00	15261.00	-27.00
86	80.00	-6.00	15229.00	-32.00
172	173.00	1.00	15169.00	-60.00
258	260.00	2.00	15113.00	-56.00
344	342.00	-2.00	15062.00	-51.00
430	423.00	-7.00	15011.00	-51.00
ø Messabweichung		3.10		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 258kg
Referenzpunkt 2

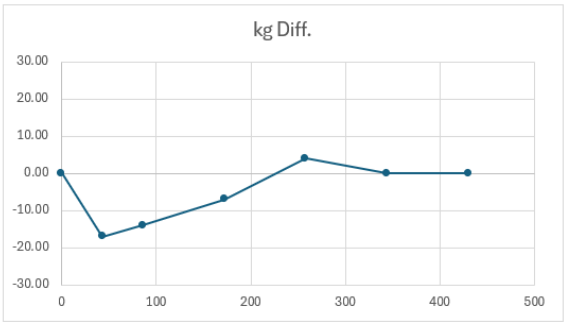
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15290.00	9.00
43	30.00	-13.00	15261.00	-29.00
86	74.00	-12.00	15232.00	-29.00
172	168.00	-4.00	15171.00	-61.00
258	258.00	0.00	15113.00	-58.00
344	338.00	-6.00	15062.00	-51.00
430	420.00	-10.00	15011.00	-51.00
ø Messabweichung		4.50		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 344kg
Referenzpunkt 2

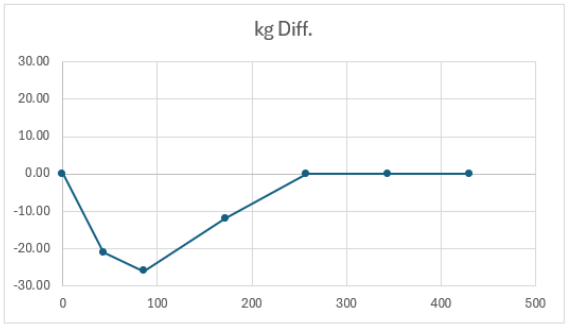
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15293.00	12.00
43	26.00	-17.00	15264.00	-29.00
86	72.00	-14.00	15235.00	-29.00
172	165.00	-7.00	15175.00	-60.00
258	262.00	4.00	15115.00	-60.00
344	344.00	0.00	15064.00	-51.00
430	430.00	0.00	15010.00	-54.00
ø Messabweichung		4.20		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 430
Referenzpunkt 2

kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15294.00	13.00
43	22.00	-21.00	15267.00	-27.00
86	60.00	-26.00	15242.00	-25.00
172	160.00	-12.00	15178.00	-64.00
258	258.00	0.00	15116.00	-62.00
344	344.00	0.00	15062.00	-54.00
430	430.00	0.00	15009.00	-53.00
ø Messabweichung		5.90		



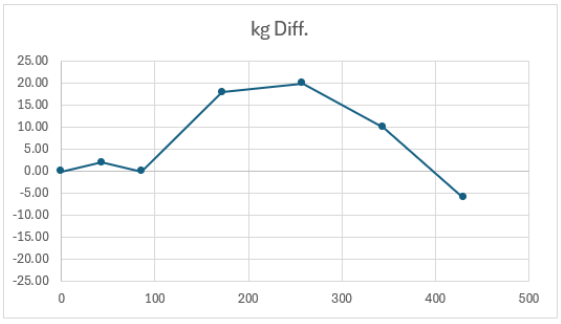
3-Punkte-Kalibrierung KL66

Nullpunkt kalibriert bei 15295 Hz

Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 86kg
Referenzpunkt 2 430kg

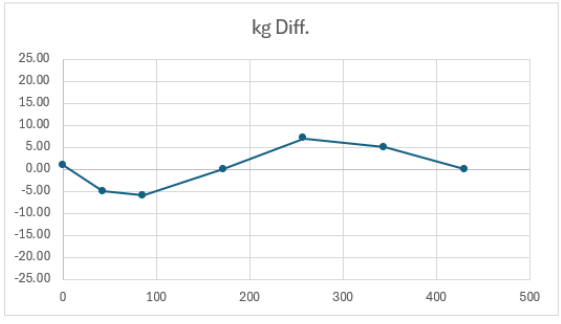
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15295.00	0.00
43	45.00	2.00	15269.00	-26.00
86	86.00	0.00	15244.00	-25.00
172	190.00	18.00	15180.00	-64.00
258	278.00	20.00	15121.00	-59.00
344	354.00	10.00	15067.00	-54.00
430	424.00	-6.00	15014.00	-53.00
ø Messabweichung		5.60		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1 172kg
Referenzpunkt 2 430kg

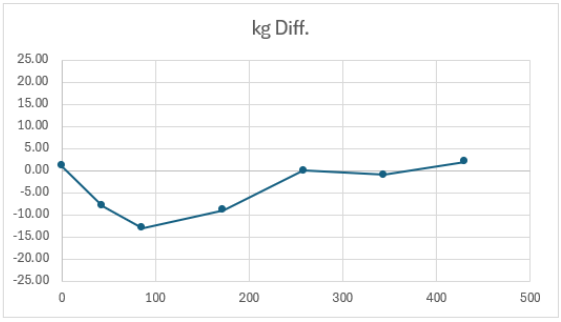
kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	1.00	1.00	15294.00	-1.00
43	38.00	-5.00	15269.00	-25.00
86	80.00	-6.00	15241.00	-28.00
172	172.00	0.00	15179.00	-62.00
258	265.00	7.00	15117.00	-62.00
344	349.00	5.00	15062.00	-55.00
430	430.00	0.00	15009.00	-53.00
ø Messabweichung		2.40		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1	258kg
Referenzpunkt 2	430kg

kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	1.00	1.00	15294.00	-1.00
43	35.00	-8.00	15269.00	-25.00
86	73.00	-13.00	15242.00	-27.00
172	163.00	-9.00	15179.00	-63.00
258	258.00	0.00	15116.00	-63.00
344	343.00	-1.00	15062.00	-54.00
430	432.00	2.00	15008.00	-54.00
ø Messabweichung		3.40		



Messung KL66 Kabinenboden Testanlage

Referenzpunkt 1	344kg
Referenzpunkt 2	430kg

kg soll	kg ist	kg Diff.	Hz ist	Hz Diff.
0	0.00	0.00	15297.00	2.00
43	33.00	-10.00	15270.00	-27.00
86	72.00	-14.00	15242.00	-28.00
172	162.00	-10.00	15180.00	-62.00
258	256.00	-2.00	15118.00	-62.00
344	344.00	0.00	15061.00	-57.00
430	433.00	3.00	15007.00	-54.00
ø Messabweichung		3.90		

