



Experimentelle Untersuchungen zur Kollisionserkennung bei elektrisch höhenverstellbaren Bürotischen

Diplomarbeit

durchgeführt von

Matthias Buch

Matrikelnummer 0430290

Studienkennzahl F719

Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Brasseur

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Brandner

Graz, im Juni 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am.....

.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Bei der Bewegung von elektrisch höhenverstellbaren Bürotischen besteht die Möglichkeit, dass im Bereich des Tisches bei einer Kollision Objekte zerstört werden oder Körperteile des Benutzers eingeklemmt werden. Die Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist die experimentelle Untersuchung messtechnischer Systeme, die der Antriebssteuerung das Auftreten solcher Situationen signalisieren, wodurch die Höhenverstellung gestoppt werden kann, bevor gefährlich hohe Kontaktkräfte auftreten. Ausgehend vom Stand der Technik werden jene physikalischen Größen erhoben und kategorisiert, die sich bei einem Aufprall auf ein Hindernis ändern. Für ausgewählte Größen werden messtechnische Einrichtungen im Labor aufgebaut, um in weiterer Folge die Messwerte so weiter zu verarbeiten, dass die Detektion einer Kollision unter verschiedenen äußeren Einflüssen wie der Beladung des Tisches möglich ist. Mit den Mitteln der statistischen Messsignalverarbeitung wird abschließend die Leistungsfähigkeit der einzelnen Varianten erhoben und verglichen. Die besten Resultate liefert ein Verfahren, bei dem die Auflagerkräfte des Tisches gemessen werden. Dadurch ist es möglich, direkt auf die Kontaktkraft zu schließen. Bereits geringe Kontaktkräfte im Bereich 20-30 N können auf diese Weise detektiert werden.

Abstract

During the movement of electrically height adjustable office tables it is possible that during a collision objects within the range of the table get damaged or that body parts of the user get pinched. The aim of this diploma thesis is the experimental analysis of measurement systems that signal collisions to the motor control unit, which can stop the movement before the contact forces reach a dangerous level. Based on a review of the state of the art, the physical quantities which are affected by a collision are listed and categorised. Measurement systems for selected quantities are built in the laboratory. These test setups are used to develop detection algorithms taking into account influences such as changes in the table load. Statistical signal processing techniques are used to evaluate and compare the performance of the collision detectors. The best results are obtained using the measurement of the reaction forces of the table, which makes it possible to directly calculate the contact force. Even forces as small as 20-30 N can be detected with this method.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei jedem bedanken, der mich während meiner Studienzeit unterstützt hat, insbesondere bei meiner Freundin, bei meinen Freunden und Verwandten für jedes aufmunternde Wort und jede Geste der Rücksicht und Hilfsbereitschaft.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Kollegen bei LogicData, die mir dabei geholfen haben, einen tieferen Einblick in die Systemkomponenten und die Software der Steuerung zu gewinnen, und die mir mit ihrer Terminplanung immer entgegen kamen, sodass ich die firmeneigenen Messgeräte für meine Experimente verwenden konnte.

Ohne die Finanzierung des zusätzlichen Equipments wären die Experimente nicht möglich gewesen, ich möchte mich daher bei Herrn DI Walter Koch, dem Geschäftsführer der Firma LogicData, für das Vertrauen bedanken, das mir von ihm und dem gesamten Unternehmen entgegengebracht wird.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn DI Dr. Markus Brandner für die umsichtige Betreuung meiner Diplomarbeit.

Ich widme diese Diplomarbeit meinen Eltern, die mich während meines Studiums in jeder erdenklichen Art und Weise unterstützt haben und mir über alle Höhen und Tiefen hinweg zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Stand der Technik.....	4
3.1 Messen von Verformungen mit Dehnungsmessstreifen.....	4
3.2 Messen von Laständerungen mit Piezo-Elementen	6
3.3 Messen von Laständerungen aus Antriebssystemgrößen.....	7
3.4 Quetschschutzeinrichtung für elektrische Fensterheber im Automobilbereich.....	8
3.5 Einsatz von Quetschschutzleisten	8
3.6 Messen der Verkipfung der Tischplatte.....	9
3.7 Körperschallmessung mit MEMS-Beschleunigungssensoren	10
3.8 Diskussion	10
4. Modellierung des Messproblems	11
4.1 Beeinflusste physikalische Größen	11
4.1.1 Auflagerkräfte des Tisches	12
4.1.2 Änderungen im Antriebssystem	12
4.1.3 Verkipfung der Tischplatte	13
4.1.4 Verformung von Tischplatte und Trägerelementen	13
4.2 Kategorisierung und Auswahl der zu analysierenden Größen	14
5. Messtechnische Erfassung der ausgewählten Größen.....	15
5.1 Messprinzipien zur Kraftmessung.....	15
5.1.1 Dehnungsmessstreifen	15
5.1.2 Piezoelektrischer Effekt.....	16
5.1.3 Optische Methoden.....	16
5.1.4 Auswahl.....	17
5.2 Messprinzipien zur Lagemessung	17
5.2.1 Tilt-Sensorik	17
5.2.2 Lasertriangulation.....	17
5.2.3 Beschleunigungssensorik	18
5.2.4 Auswahl.....	19

5.3	Messen von Laständerungen	19
5.3.1	Motorstrommessung und Drehzahlmessung	20
5.3.2	Drehmomentmessung	20
5.3.3	Auswahl	21
6.	Entwicklung eines Prüfstands	21
6.1	Wägezellen und DMS-Messverstärker zur Messung der Auflagerkräfte	22
6.2	Messung und Einleitung von Kontaktkräften	24
6.3	Auswahl der Prüflinge	25
6.4	Lasertriangulationssensoren	25
6.5	Beschleunigungssensoren	29
6.6	Messung von Drehzahl und Motorstrom	30
6.7	Wahl der Abtastraten	30
6.8	Synchronisierung der Messungen	34
6.9	Analyse der auftretenden Latenzzeiten	35
6.9.1	Beschleunigungssensoren	35
6.9.2	Wägezellen und Messverstärker	36
6.9.3	Lasertriangulationssensoren	36
7.	Direkte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft	37
7.1	Einsatz der Gewichtsmessung zur Bestimmung von Kontaktkraft und Kontaktposition	37
7.1.1	Physikalische Grundlagen aus der Statik	39
7.1.2	Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems	44
7.1.3	Diskussion	50
7.2	Einsatz der Motorstrommessung der Antriebe zur Detektion von Laständerungen	52
7.2.1	Grundlagen	52
7.2.2	Kalibrierung der Umrechnung von Motorstrom auf Gewichtskraft	53
7.2.3	Mittelwertbefreiung des Kraftverlaufs	56
7.2.4	Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems	58
7.2.5	Diskussion	62

8. Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft.....	63
8.1 Einsatz der Lasertriangulationssensoren zur Messung der Verkipfung der Tischplatte	63
8.1.1 Grundlagen	63
8.1.2 Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems.....	65
8.1.3 Diskussion	68
8.2 Einsatz von Beschleunigungssensoren zur Ermittlung der Lage der Tischplatte.....	69
8.2.1 Grundlagen	69
8.2.2 Einschränkungen aufgrund der Sensorik.....	70
8.2.3 Diskussion	73
8.3 Aufpralldetektion mit Körperschallmessung	74
8.3.1 Diskussion	76
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	77
9.1 Direkte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft.....	77
9.2 Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft	79
9.3 Ausblick	80
10. Literaturverzeichnis	82

1. Einleitung

Der ergonomische Arbeitsplatz wird angesichts steigender Zahlen von haltungsbedingten Gesundheitsbeschwerden immer wichtiger. Viele Unternehmen im skandinavischen Raum nehmen in diesem Zusammenhang eine Vorreiterrolle ein, da höhenverstellbare Büromöbel wie Tische und Sessel in diesen Ländern seit Jahren quasi Standard sind. Die Sessel können entsprechend der Körpergröße angepasst werden, die Tische sind zumeist so aufgebaut, dass sowohl eine Sitz-, als auch eine Stehposition eingenommen werden kann. Die Standard-Tischmodelle sind mit manuellen Verstellmechanismen ausgestattet, die Höhenverstellung von High-End-Modellen wird mit Elektromotoren realisiert. Abbildung 1.1 zeigt eine schematische Darstellung eines Bürotisches mit den typischen Komponenten eines elektrischen Verstellsystems.

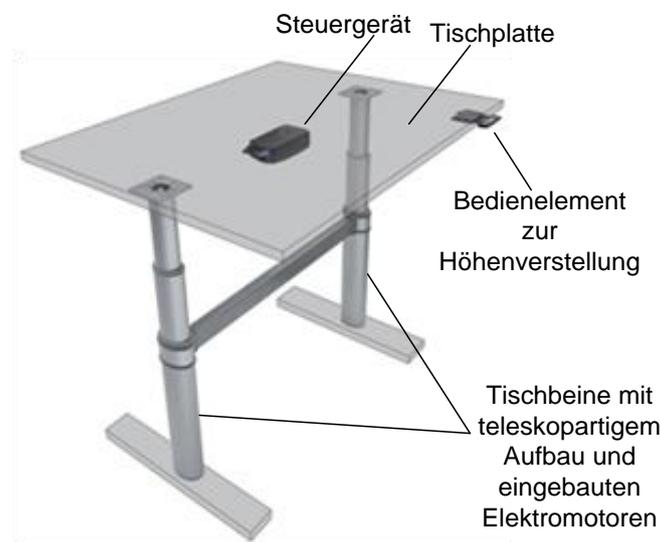


Abbildung 1.1: Bürotisch mit Systemkomponenten; im Allgemeinen besteht ein elektrisch höhenverstellbarer Tisch aus einer Tischplatte, einem Steuergerät für die Antriebe, einem Bedienelement und zwei teleskopartig aufgebauten Tischbeinen mit eingebauten Elektromotoren; die Motoren sind an Spindeln zur Linearbewegung gekoppelt

In den teleskopartig aufgebauten Tischbeinen sind Elektromotoren über ein Getriebe mit einem Spindelsystem verbunden und das Bewegungsschraubenprinzip ermöglicht die lineare Hubbewegung. In einigen Tischbein-Modellen werden mechanische Bremsen eingesetzt, um zu verhindern, dass die Lineareinheiten aufgrund zu geringer Selbsthemmung des Antriebsstrangs unkontrolliert einfahren. Die Grundaufgabe des Steuergeräts ist die Regelung der Elektromotoren, sodass eine synchrone Hubbewegung mit beiden Antrieben realisiert werden kann. Die Motoren werden mit einer pulsweitenmodulierten Versorgung (PWM) gespeist. Bedienelemente dienen in erster Linie der Benutzereingabe, wenn die Position der Tischplatte verändert werden soll. Die Funktionalitäten des Steuergeräts und des Bedienelements werden immer unter Berücksichtigung der Sicherheit für den Benutzer und dessen Umgebung entwickelt. Kollisionen beim Verfahren mit der Tischplatte sind in Büros

durchaus mögliche Szenarien, denn Objekte wie Rollcontainer, offene Fenster oder andere Tische können beschädigt werden. Da sich der Benutzer ebenfalls im Gefahrenbereich befindet sind Verletzungen wie Quetschungen oder Knochenbrüche denkbar. Um die Notwendigkeit eines Kollisionsschutzes bei der Hubbewegung elektrisch höhenverstellbarer Bürotische zu zeigen, werden in Abbildung 1.2 zwei typische Belastungsfälle vorgestellt, die durch Kollisionen der Tischplatte mit einem Objekt auftreten können. Bei den Hindernissen kann es sich um Rollcontainer, andere Tische, Bürosessel, etc. handeln. Überlappen sich Tischplatte und Hindernis (Fall a) führt eine Druckkraft zu Quetschungen von Körperteilen, zum Verkippen der Tischplatte oder zum Verlust des Bodenkontakts eines Tischbeins. Monitore oder andere Objekte können in Folge von der stark gekippten Tischplatte rutschen. Wenn die Tischplatte nahe an einem Objekt vorbeifährt (Fall b), sind durch Scherkräfte schwere Verletzungen an eingeklemmten Händen möglich. In beiden Beanspruchungsfällen führen bereits geringe Kräfte in der Größenordnung von ca. 50 N - 100 N zu Brüchen von Handwurzel- und Fingerknochen.

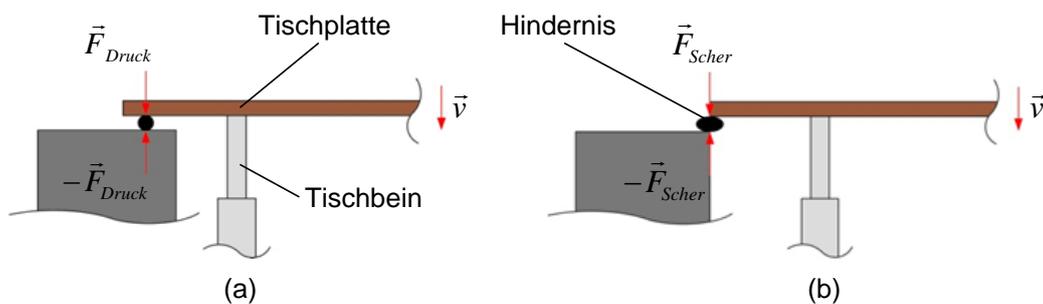


Abbildung 1.2: Kollisionsszenarien bei der Abwärtsbewegung der Tischplatte; überlappen sich Tischplatte und Hindernis kommt es zu Druckbeanspruchung der geklemmten Objekte (a); fährt die Tischplatte knapp an einem Objekt vorbei können Scherkräfte eingeklemmte Hindernisse belasten (b)

Der Entwurf eines Systems, das den Benutzer vor quetschungsbedingten Gesundheitsschäden schützen soll, wird durch den enormen Kostendruck, der Variabilität der Tischlast, sowie der mangelnden Tauglichkeit der verschiedenen, untersuchten Messsysteme zur Hochvolumen-Produktion erschwert.

2. Aufgabenstellung

Der Auftraggeber dieser Diplomarbeit ist die Firma Logicdata, ein Anbieter für Steuergeräte und Bedienelemente für elektrisch höhenverstellbare Büro- und Komfortmöbel. In Absprache mit Logicdata wird das Ziel festgelegt, ein Sensorsystem zur Detektion von Quetschungen bei der Höhenverstellung zu entwickeln. Damit soll in weiterer Folge sowohl ein Personenschutz als auch ein Schutz des Systems und dessen Umgebung vor mechanischer Zerstörung verwirklicht werden. Da der Personenschutz strengere Anforderungen an die Abschaltsschwellen liefert als der Schutz der mechanischen Komponenten, muss ein Stoppen der Motoren bei geringen Kräften im Bereich von 20-50 N möglich sein. Eine Kontaktkraft dieser Größenordnung kann sich bereits in weniger als 0.5

Sekunden aufbauen, dies legt die Forderung nach Reaktionsschnelligkeit des Systems nahe. Die Sensoreinheit muss der Steuerung im Fall einer zu hohen Kraft signalisieren, mit der Tischplatte in die Gegenrichtung zu verfahren um die Kraft sofort abzubauen. Diese „Drive-Back“ genannte Reaktion des Systems ist ein bereits implementiertes Sicherheitsfeature und kann über eine dafür vorgesehene Schnittstelle zu vorgeschalteten Quetschdetektoren ausgelöst werden.

Neben der Forderung einer geringen Abschaltchwelle sind einige Randbedingungen einzuhalten. Kollisionsszenarien sind an unterschiedlichen Positionen möglich, daher gilt die gesamte obere und untere Fläche der Tischplatte als Gefahrenzone. Das bedeutet, dass die Leistungsfähigkeit der Kollisionsdetektion für unterschiedliche Quetschpositionen zu analysieren ist. Um eine Anpassung an verschiedene Tischmodelle und die Variation der Schaltschwelle des Quetschdetektors zu ermöglichen, ist darauf zu achten, dass das Konzept eine Parametrierung, beispielsweise durch Servicetechniker, ermöglicht. Als Vorbereitung auf eine serientaugliche Produktion ist zu klären an welcher Position die Sensoreinheit aufgebaut werden muss, falls der Detektor eine Sensorpositionsabhängigkeit der Empfindlichkeit aufweist. Dadurch kann festgelegt werden ob für die Sensorik ein eigenes Produkt entwickelt werden muss oder ob es möglich ist, alle notwendigen Elemente direkt in die Steuerung oder das Bedienelement zu integrieren. Da die Erfahrung des Auftraggebers zeigt, dass die variable Beladung der Tischplatte und die Quetschung weicher Objekte Probleme für die Detektion von Quetschungen darstellen, sind diese Aspekte bei den Versuchen zu berücksichtigen und die Abhängigkeit der Detektorperformance von diesen Einflüssen zu diskutieren.

Als Ausgangspunkt der Entwicklung des Kollisionsschutzes dient die Stand-der-Technik-Recherche in Kapitel 3 um aktuell eingesetzte Systeme zu analysieren und um einen Einblick in die Problematik zu gewinnen. Dabei sollen auch Patente von Mitbewerbern analysiert werden, eine Lizenznahme wird jedoch ausgeschlossen. Ausgehend vom Stand der Technik werden in Kapitel 4 alle Größen systematisch erfasst, die sich durch eine Quetschung ändern. Für jene physikalischen Größen, die als geeignete Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen ausgewählt werden, werden in Kapitel 5 geeignete Messprinzipien ausgewählt. Um reproduzierbare Experimente durchführen zu können, wird der in Kapitel 6 beschriebene Prüfstand gebaut. In Kapitel 7 und 8 wird gezeigt, wie die gemessenen physikalischen Größen durch mathematische Modelle in Größen transformiert werden, mit denen beispielsweise ein Schwellwertdetektor entscheiden kann, ob eine Quetschung vorliegt oder nicht. Die experimentelle Validierung wird an einem Original-Tischsystem durchgeführt, dass vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wird. Somit ist es möglich zu entscheiden, ob sich die gezeigten Verfahren zur Kollisionsdetektion eignen. Kapitel 9 bietet eine abschließende Zusammenfassung und einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und die Systemintegration.

3. Stand der Technik

Im diesem Kapitel werden einerseits bestehende Lösungen am Zielmarkt erläutert und andererseits Verfahren präsentiert, mit denen Quetschungen oder Kollisionen in anderen Anwendungen detektiert werden können. Zusätzlich werden Versuche aus einer frühen Entwicklungsphase eines alternativen Sensorkonzepts gezeigt. Die Erhebung des Standes der Technik dient in weiterer Folge dazu, einen Einblick in die gesamte Problematik des Quetschschutzes an elektrisch höhenverstellbaren Bürotischen zu erlangen. Mit den Schlussfolgerungen, die aus dem untersuchten Pool an Verfahren gezogen werden können, ist neben der Analyse der beeinflussten Größen auch das Erkennen von Vorteilen und Einschränkungen einzelner Ansätze möglich.

3.1 Messen von Verformungen mit Dehnungsmessstreifen

Aus der Kontaktkraft, die sich zwischen Tisch und gequetschtem Objekt aufbaut, resultiert die Dehnung eines speziell konstruierten Biegestabs, der beispielsweise in den Auflagerpunkten zwischen Tischplatte und Tischbeinen montiert ist. Diese Verformung kann mit Dehnungsmessstreifen (DMS) auf den Biegebalken gemessen werden. Dieses Verfahren wird für spezielle Lösungen bereits eingesetzt, es ist aber mit konstruktivem Aufwand verbunden. So muss der Hersteller der Tische und Antriebe eng mit dem Produzenten der Motorsteuerungen zusammenarbeiten, um die Sensoren für den Endkunden unsichtbar und mit bestmöglicher Empfindlichkeit einzubauen.

Ein System auf DMS-Basis wird vom Auftraggeber in einer kundenspezifischen Lösung bereits eingesetzt, dabei wird die Tischplatte mit dem Unterbau über eine spezielle Aufhängung verbunden. [1] Eine Wägezelle mit einem DMS nimmt Dehnungen aufgrund der Kontaktkraft auf.

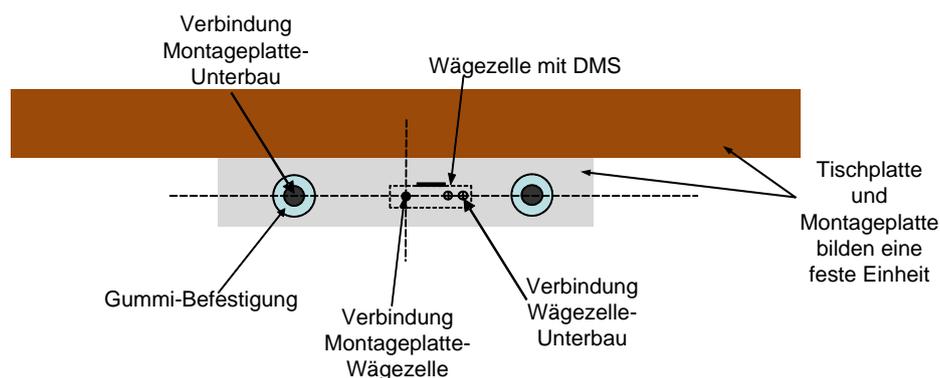


Abbildung 3.1: Seitenansicht auf die Tischplatte, das System wird in dieser Abbildung nicht durch eine Quetschung verformt

Die Tischplatte wird mit 2 als L-Profil geformten Montageplatten verschraubt, diese sind über Gummipuffer und Wägezellen mit dem Unterbau (den Tischbeinen und Querträgern) verbunden (vgl. Abbildung 3.1). Wirkt im Fall einer Quetschung eine Kraft auf das System ein wird die Tischplatte gekippt,

wodurch sich auch die Wägezelle verformt und der DMS eine Widerstandsänderung erfährt (vgl. Abbildung 3.2).

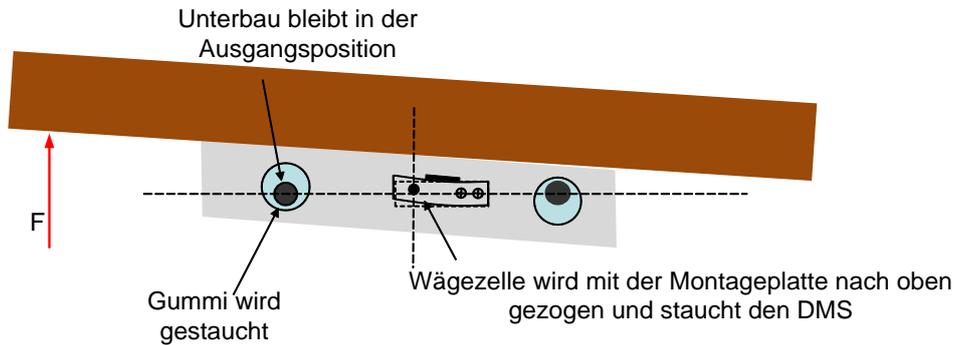


Abbildung 3.2: Seitenansicht auf die Tischplatte bei einer Quetschung; die Wägezelle wird durch die einwirkende Kontaktkraft verformt; diese Verformung kann mit dem auf der Wägezelle angebrachten DMS gemessen werden

Der eingesetzte DMS-Messverstärker wird so aufgebaut, dass aufgrund einer kapazitiven Entkopplung nur Änderungen im System verstärkt werden, somit wird nicht das Absolutgewicht des Tisches zur Detektion einer Quetschung herangezogen.

Der Auftraggeber hat die Erkenntnisse aus diesem kundenspezifischen Projekt dazu genutzt, eine Quetschschutzeinrichtung zu entwerfen, die bei einer größeren Anzahl von Kunden und relativ unabhängig von deren Tischkonstruktionen eingesetzt werden kann. [2] Um diese Unabhängigkeit zu erreichen wird ein Metallbügel, auf dem ein DMS appliziert ist, auf dem metallischen Unterbau der Tischplatte und der Tischplatte selbst montiert (siehe Abbildung 3.3). Verspannt sich die Tischplattenkonstruktion aufgrund einer Krafteinwirkung erfährt auch der DMS je nach Lastfall eine Stauchung oder Dehnung. Der DMS-Messverstärker nimmt dieselbe kapazitive Entkopplung wie bei der kundenspezifischen Variante vor, somit werden nur Laständerungen detektiert.



Abbildung 3.3: Metallbügel mit appliziertem Dehnungsmessstreifen (aus [2]); wirkt eine äußere Kraft auf die Tischplatte ein verspannt sie sich gegen den metallischen Unterbau (quadratisches Formrohr); dadurch verspannt sich auch der Metallbügel und der DMS wird gestaucht oder gedehnt

Der Großteil der am Markt verfügbaren Tische weist eine Konstruktion auf, bei der die Tischplatte auf einem Querträger montiert ist (vgl. Abbildung 3.3). Daher ist der große Vorteil der in Abbildung 3.3 gezeigten Messeinrichtung, dass sie universell einsetzbar ist. Der Schwellwert zur Detektion einer Kollision muss zwar für jede Tischkonstruktion experimentell neu bestimmt werden, diese Einstellung kann jedoch sehr einfach von Servicetechnikern vorgenommen werden. Die mit DMS gemessenen Verformungen der mechanischen Verbindung zwischen Tischplatte und Unterbau hängen stark von der Beladung des Tisches und vom eingeklemmten Objekt ab, außerdem steht der gewählte Schwellwert, der für die Detektion einer Kollision nötig ist, nicht in direktem Zusammenhang mit der Kraft, die bei der Kollision auftritt.

3.2 Messen von Laständerungen mit Piezo-Elementen

In der Patentschrift [3] eines Mitbewerbers wird eine Methode vorgestellt, die ein Piezo-Element im Bereich der mechanischen Verbindung von Tischplatte und Tischbeinen vorsieht. Durch äußere Kräfte wird das Piezo-Element gequetscht und mit einer C/V-Wandlung kann ein Spannungssignal generiert werden. Da der Effekt der Ladungstrennung in der Kristallstruktur von Piezo-Elementen nur die Erfassung dynamischer Kräfte ermöglicht, ist diese Methode nur gegenüber Laständerungen empfindlich.

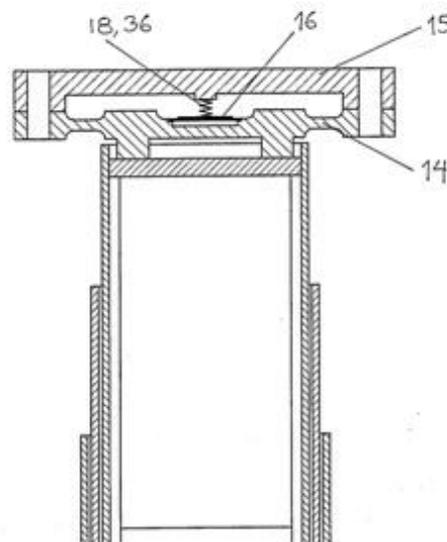


Abbildung 3.4: Schnitt durch das Tischbein (aus [3]); der Anschlussflansch zur Montage des Tischbeins wird als Sandwichkonstruktion (Zeichnungsnummern 14 und 15) ausgeführt, im Inneren dieser Konstruktion wird ein Piezo-Element (Zeichnungsnummer 16) über eine Feder und eine Spannplatte (Zeichnungsnummern 18 und 36) in Position gehalten; im Falle einer Kollision wird das Piezo-Element gedrückt, wodurch eine messbare Ladungstrennung stattfindet

Abbildung 3.4 zeigt einen Schnitt durch ein Tischbein, das Piezo-Element (Zeichnungsnummer 16) wird über eine Feder und eine Spannplatte (Zeichnungsnummern 18 und 36) in einer Sandwichkonstruktion (Zeichnungsnummern 14 und 15) in Position gehalten. Erfährt diese Konstruktion eine stoßhafte Laständerung, kommt es in der kristallinen Struktur des Piezo-Elements zu einer Ladungs-

trennung, und über einen C/V-Wandler wird ein Spannungssignal an die Steuerung ausgegeben um ab einem definierten Schwellwert die Motoren zu stoppen. Der Mitbewerber nutzt bei diesem System die Tatsache, dass das Unternehmen die komplette Steuerungstechnik und die Tischbeine selbst entwickelt, wodurch die Schnittstellen zu Systempartnern wegfallen und die simultane Entwicklung von Mechanik und Elektronik ein abgestimmtes und optimiertes Konzept ermöglichen. Aufgrund der patentrechtlichen Situation kann dieses Verfahren nicht eingesetzt werden, da eine Lizenznahme für den Auftraggeber nicht in Frage kommt.

3.3 Messen von Laständerungen aus Antriebssystemgrößen

Aktuell nutzt der Auftraggeber das Drehzahlsignal um durch Drehzahländerungen auf eine Änderung der Last zu schließen. Dabei muss die Drehzahl während der Konstantfahrt des Antriebssystems innerhalb parametrierbarer Grenzen bleiben. Diese Grenzen können, um die Empfindlichkeit zu steigern, auch dynamisch von der Motorsteuerung angepasst werden. Eine messbare Drehzahländerung wird jedoch nur beim Einwirken von vergleichsweise hohen äußeren Kräften erreicht. Dieses ISP („Intelligent System Protection“) genannte Abschaltssystem kann aus diesem Grund lediglich zum Schutz der Tischkomponenten vor mechanischer Zerstörung eingesetzt und nicht als Personenschutz angeboten werden.

Die direkte Auswertung der Motorstrommessung wird aktuell nicht genutzt um auf Laständerungen und somit auf Quetschungen zu schließen. Als Grund hierfür wird die qualitativ schlechte Motorstrommessung genannt, da zum einen die Auflösung des A/D-Umsetzers gering ist und zum anderen die Messgenauigkeit stark darunter leidet, wenn die PWM der Spannungsversorgung der Motoren eine geringe Einschaltdauer aufweist. Ein weiteres Problem ergibt sich aufgrund der Tatsache, dass sich der Einsatz mechanischer Bremsen auf das Stromsignal auswirkt. Dies erschwert den Rückschluss von Stromänderungen auf eine Kollision.

3.4 Quetschschutzeinrichtung für elektrische Fensterheber im Automobilbereich

Für das Stoppen elektrischer Fensterheber beim Kontakt mit einem Hindernis werden derzeit mehrere modellbasierte Prinzipien angewendet, die über ein mathematisches Modell des Motorsystems aus der Drehzahl oder aus dem Motorstrom das Drehmoment errechnen. Eine nachgeschaltete Schwellwertoperation sorgt für ein Abschalten des Motors in einer Quetschsituation. Im Artikel [4] wird ein Quetsch-Drehmoment-Schätzer vorgestellt, der Daten für ein Not-Stopp-System eines elektrischen Fensterhebers liefert. Aus der Drehzahl des Motors, die mit einem Hallsensor aufgenommen wird, schätzt ein H_o -Beobachter das Drehmoment an der Welle. Diese Methode ist deshalb sehr geeignet, da sie auch bei Parameterunsicherheiten des Antriebssystems gut funktioniert. Im Artikel [5] wird anstelle des H_o -Beobachters ein Kalman-Filter eingesetzt, wodurch das Ergebnis in verrauschter Messumgebung verbessert wird. Wird eines dieser Verfahren auf elektrisch höhenverstellbare Tische adaptiert ergibt sich der Vorteil, dass keine zusätzlichen Sensoren nötig sind, da die Motorsteuerung bereits Motorstrom- und Drehzahlsignale zur Verfügung hat. Problematisch ist hingegen, dass bei elektrischen Fensterhebern immer vergleichbare Lastmomente vorhanden sind, denn die bewegte Masse der Fensterscheibe ist keine Variable. Das Tischsystem kann jedoch mit verschiedenen Gewichten belastet werden.

3.5 Einsatz von Quetschschutzeleisten

Eine Quetschschutzeleiste ist im Allgemeinen ein Gummirohr mit rechteckigem Querschnitt. Ein Schnitt durch das Rohr wird in Abbildung 3.5 gezeigt.

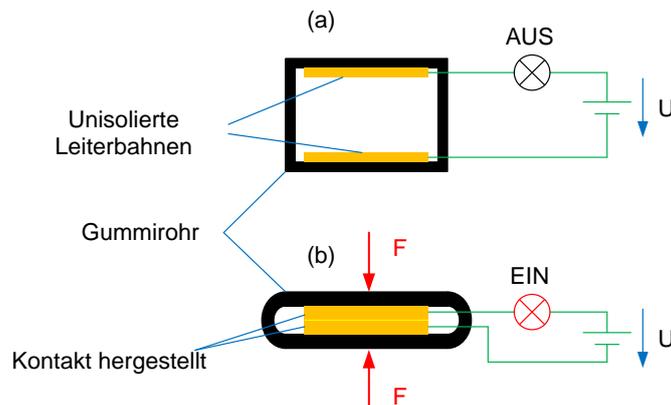


Abbildung 3.5: Quetschschutzeleiste bestehend aus einem Gummirohr und zwei unisolierten Leiterbahnen im Inneren; ein außen angelegter Stromkreis ist ohne Kräfteinfluss nicht geschlossen (a) und unter Kräfteinfluss geschlossen, da sich die Leiterbahnen berühren (b)

Die beiden unisolierten Leiterbahnen im Inneren des Gummirohrs sind ohne Einfluss einer äußeren Kraft (a) voneinander getrennt, sodass ein außen angelegter Stromkreis nicht geschlossen ist. Wirkt eine äußere Kraft ein (b), wird der Stromkreis durch die Berührung der Leiterbahnen geschlossen. Über den Härtegrad und die Geometrie des Gummi-Formrohres lässt sich die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Kräften einstellen. Die Auswertung einer

Quetschschutzeleiste kann beispielsweise über einen binären Eingang der Steuerung erfolgen, durch die Pegeländerung wird ein Quetschereignis angezeigt. Die Software muss eine Entprellung des Eingangs vornehmen und das Antriebssystem im Fall einer Kollision stoppen. Die Quetschschutzeleiste wird zum Auffahrschutz bei der Abwärtsfahrt an der unteren Tischplattenfläche entlang der Kanten aufgeklebt, genau in dieser Tatsache liegen auch die Nachteile dieser Variante. Die Gummirohre können nur entlang ausgesuchter Linien verlegt werden, wodurch die übrigen Bereiche nicht gegen Quetschungen gesichert sind. Auch die Montage, genauer gesagt das Aufkleben auf die Tischplatte, birgt Probleme, da sich die Quetschschutzeleiste einerseits lösen kann und andererseits optisch auffällig und dem Produktdesign nicht dienlich ist.

3.6 Messen der Verkippung der Tischplatte

Die Patentschrift [6] eines Mitbewerbers zeigt einen Aufbau basierend auf einer flüssigkeitsgefüllten Kapazität. Diese wird mit der Tischplatte verbunden.

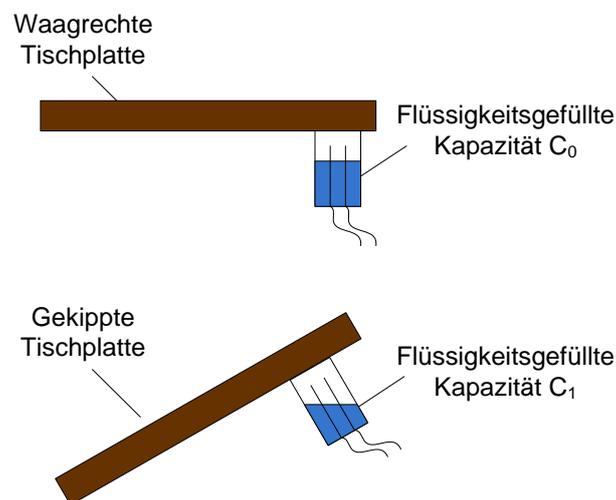


Abbildung 3.6: Funktionsweise der flüssigkeitsgefüllten Kapazität; wird die Tischplatte gekippt, ändert sich die Kapazität des Kondensators, da sich die Flüssigkeit im Schwerfeld der Erde neu ausrichtet

Wie Abbildung 3.6 zeigt, führt eine Änderung des Tischplattenwinkels zu einer Änderung der Kapazität von C_0 auf C_1 , denn der Flüssigkeitsspiegel gleicht sich bei Verkippung wieder zur Waagrechten aus. Dadurch ändert sich die Flüssigkeitsabdeckung der Elektroden, und da das eingefüllte Gas eine andere Dielektrizitätszahl als die Flüssigkeit hat, ändert sich die Kapazität der Anordnung. Durch Auswertung der Kapazität des Kondensators kann somit auf den Kippwinkel geschlossen werden. Dieses System eignet sich nicht zur Detektion von geringen Kontaktkräften. Bedingt durch die Trägheit der Flüssigkeit und wegen des schwachen Zusammenhangs zwischen Kontaktkraft und Kippwinkel der Tischplatte kann, wie aus dem Patent [6] hervorgeht, lediglich detektiert werden, wenn ein Tischbein den Bodenkontakt verliert. Die dazu nötigen Kontaktkräfte sind jedoch weit höher als die vom Auftraggeber spezifizierten Abschaltsschwellen.

3.7 Körperschallmessung mit MEMS-Beschleunigungssensoren

Mit mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) können beispielsweise Sensorstrukturen aufgebaut werden, um dreidimensional Beschleunigungen zu messen. Damit können auch abgeleitete physikalische Größen bestimmt werden, wie zum Beispiel die Lage eines Objektes im Raum. Im Abschlussbericht [7] der Projektgruppe des an der TU Graz abgehaltenen Product Innovation Project 2009 wird ein Prototyp eines Sicherheitssystems für elektrisch höhenverstellbare Tische vorgestellt. Basis ist ein MEMS-Beschleunigungssensor, der Beschleunigungen entlang der drei Raumachsen messen kann. Der Beschleunigungssensor wird dabei auf der Tischplatte platziert, die Beschleunigung wird entlang der beiden Raumachsen in der Tischebene gemessen. Daher entspricht dieses Verfahren einer vereinfachten Körperschallmessung, mit dem Vibrationen und Erschütterungen aufgenommen werden. Falls die Beschleunigung in einer der beiden Achsrichtungen in der Tischebene einen Schwellwert überschreitet, wird das Antriebssystem gestoppt. Eine genaue Analyse dieses Systems in verschiedenen Betriebsfällen, beispielsweise für unterschiedliche Beladungszustände des Tisches oder unterschiedliche Härte der eingequetschten Objekte, konnte im Zuge dieses Projektes nicht vorgenommen werden. Es zeichnet sich aber ab, dass die Erkennung von Kollisionen des Tisches mit harten Objekten möglich ist.

3.8 Diskussion

Die Analyse der aktuell eingesetzten Verfahren zur Detektion von Kollisionen zeigt, dass sehr viele verschiedene Ansätze verfolgt und teilweise auch patentiert wurden. Die modellbasierte Drehmomentberechnung, die für elektrische Fensterheber eingesetzt wird, und die Körperschallmessung mit Beschleunigungssensoren sind, verglichen mit den bestehenden Lösungen am Markt, alternative Ansätze, die vom Auftraggeber bislang nicht eingesetzt werden. In den vergangenen zwei Geschäftsjahren wurde vornehmlich in die Entwicklung der in Kapitel 3.1 vorgestellten DMS-Messtechnik investiert. Da eine Vielzahl von Auswirkungen einer Kollision genutzt wird um diese Ereignisse zu erkennen, muss im nächsten Schritt eine systematische Erfassung und Kategorisierung der beeinflussten physikalischen Größen erfolgen, um in weiterer Folge zu entscheiden, welche Verfahren einer eingehenden Analyse unterzogen werden sollen.

4. Modellierung des Messproblems

Ausgehend vom Stand der Technik kann ein Einblick gewonnen werden, welche physikalischen Größen sich am gesamten Tischsystem ändern, wenn eine Quetschung während der Fahrt eintritt. In diesem Kapitel werden die Größen aufgezählt und kategorisiert, anschließend wird analysiert welche Größen sich als Ausgangspunkt eines Detektor-Entwurfs eignen und daher messtechnisch erfasst werden müssen.

4.1 Beeinflusste physikalische Größen

Fährt der Tisch auf ein Hindernis auf, baut sich an der Kontaktstelle eine Kraft auf, die Einfluss auf mehrere Größen im System hat. Diese Größen werden in Abbildung 4.1 dargestellt. Wie bereits aus dem Stand der Technik hervorgeht, beeinflusst eine Kollision neben der Form und Lage von Tischkomponenten auch das Antriebssystem und Kraftsysteme an Auflager- und Verbindungspunkten.

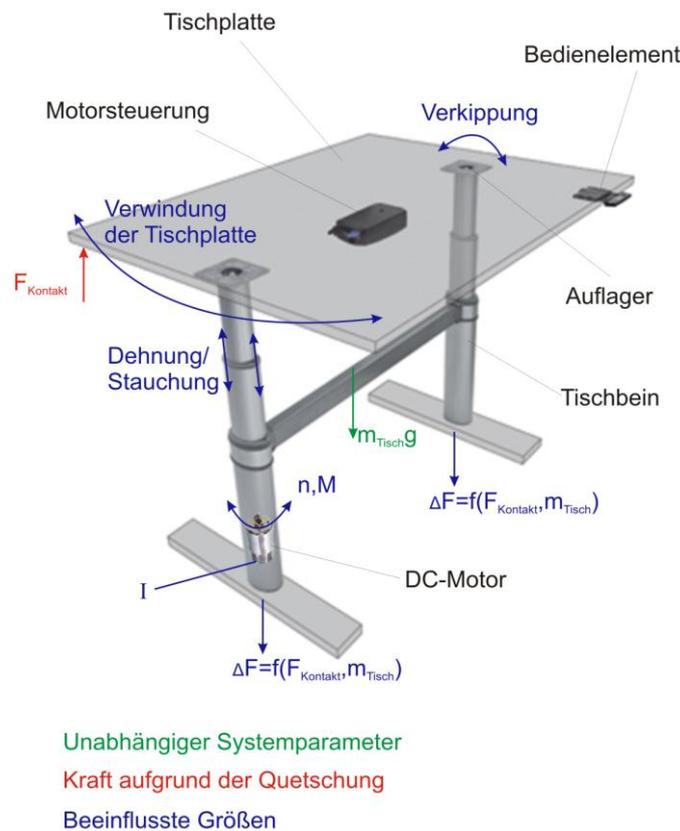


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Tisches im Quetschfall; je nach Position der Kollision ist die Änderung der beeinflussten physikalischen Größen stärker oder schwächer ausgeprägt

In Abbildung 4.1 ist eine mögliche Kollisionsposition durch die eingeleitete Kraft F_{Kontakt} angedeutet. Es ist offensichtlich, dass Quetschungen im gesamten Bereich der Tischplatte möglich sind, außerdem ist zu erwarten, dass die Änderungen der beeinflussten Größen für Kollisionen an unterschiedlichen Positionen verschieden ausgeprägt sind. So wird beispielsweise die Verkipfung der Tischplatte beim Einleiten einer Kontaktkraft an der in Abbildung 4.1 gezeigten Position größer

sein als bei einer Kollision in der Nähe eines Tischbeins. Auch die Erfahrungen des Auftraggebers mit dessen angebotenen Quetschschutzeinrichtungen zeigen, dass der Umgang mit Auffahrereignissen in der Umgebung der Tischbeine schwieriger ist als an anderen Positionen. Daher ist es notwendig, wie bereits in der Aufgabenstellung in Kapitel 2 angedeutet wird, die Positionsabhängigkeit der einzelnen Verfahren zu analysieren.

4.1.1 Auflagerkräfte des Tisches

Die durch die Quetschung eingebrachte Kontaktkraft ändert das Kraftsystem des Tisches, sie verkleinert oder vergrößert beispielsweise die Auflagerkräfte zwischen dem Tisch und dem Boden. Werden dynamische Aspekte und die Elastizität der mechanischen Komponenten vernachlässigt, gehorcht die Verteilung der Auflagerkräfte den Gesetzen der Statik, wobei Auflagerkräfte auch Null werden können, falls der Bodenkontakt an der jeweiligen Stelle verloren geht. Die zuvor erwähnte Vernachlässigung der Dynamik und das Anwenden der Statik lassen außerdem den Schluss zu, dass die Änderung der einzelnen Auflagerkräfte zwar von der Kollisionsposition abhängen, in Summe muss das Kraftsystem jedoch Null ergeben. Daher ist die Positionsabhängigkeit dieses Verfahrens im Vergleich zu anderen eher unkritisch. Bei entsprechender Konstruktion der Montagepunkte zwischen Tischplatte und Tischbeinen, können in diesem Bereich ebenfalls Kraftänderungen auftreten, die, wie in Patentschrift [3] gezeigt wird, gemessen werden können.

4.1.2 Änderungen im Antriebssystem

Für die eingesetzten permanenterregten DC-Motoren gilt eine direkte Proportionalität zwischen dem Motorstrom und dem Drehmoment. Dieser lineare Zusammenhang kann ausgenutzt werden um mit dem Motorstrom auf die Beladung des Tisches und auf Laständerungen zu schließen, da auch zwischen dem Drehmoment und der zu bewegenden Masse des Linearantriebs ein Zusammenhang besteht. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass sich eine Laständerung auf mehrere Größen im Antriebssystem auswirkt, denn die Drehzahlmessung wird bereits entsprechend eingesetzt, wie in Kapitel 3.3 erläutert wird. Unklar ist jedoch, wie stark ausgeprägt die Änderungen der Antriebssystemgrößen sind, denn das mechanische System, bestehend aus Tisch und Spindelantrieb, hat eine Federwirkung, die eine entsprechende Dämpfung verursacht. Der Einfluss der Kollisionsposition auf die Änderung der Antriebssystemgrößen muss im Zusammenspiel mit der Beladung des Tisches betrachtet werden, da das Be- und Entlasten der Linearantriebe auf Änderungen im Kraftsystem des Tisches zurückgeführt werden kann.

4.1.3 Verkippung der Tischplatte

Da elektrisch höhenverstellbare Tische im Allgemeinen mit zwei teleskopartigen Tischbeinen ausgestattet sind (vgl. Abbildung 4.1), entsteht in der Verbindungslinie der beiden Auflagerpunkte der Tischplatte eine Drehachse, die ein Verkippen der Tischplatte unter Einfluss der Kontaktkraft verursacht. Die Verkippung ist sowohl von der Kontaktkraft und deren Normalabstand zur Drehachse als auch von Gegenmomenten abhängig, die durch Objekte auf der Tischplatte entstehen. Unter hoher Last kippt der Tisch weniger als im unbeladenen Zustand, ebenso wird eine Kollision nahe der Drehachse nur geringe Kippwinkel bewirken. Wenn die unbekannte Beladung des Tisches und deren Position nicht messtechnisch erfasst werden, kann der Kippwinkel-Schwellwert zur Detektion einer Kollision nicht lastbedingt variiert werden. Daher ist es schwierig einen Detektor zu entwerfen, der unabhängig von der Tischlast ist, selbst dann, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Kontaktkraft und Kippwinkel besteht.

4.1.4 Verformung von Tischplatte und Trägerelementen

Die Tischplatte stellt kein unendlich steifes Objekt dar, da sie einerseits aus Holz gefertigt ist und da andererseits die Abmessungen (zum Beispiel 1,8 m x 1 m bei einer Dicke von 30 mm) eine Verformung unter Krafteinfluss ermöglichen. Außer der Tischplatte werden beispielsweise auch die Tischbeine verformt. Wie aus Abbildung 4.1 zu entnehmen ist, gibt es zwischen der Kontaktkraft und den Tischbeinen einen Normalabstand, der zu Biegemomenten führt. Dieser Normalabstand liefert für die Quetschschutzeinrichtung die Abhängigkeit von der Kollisionsposition. Eine Biegebeanspruchung ist immer verknüpft mit Stauchungen und Dehnungen, im skizzierten Fall treten Verformungen zum Beispiel an den Tischbeinen auf. In den beiden genannten Fällen können die Verformungen an verschiedenen Stellen messtechnisch erfasst werden und einen Rückschluss auf das Einwirken äußerer Kräfte ermöglichen. Es ist jedoch, ähnlich wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt, damit zu rechnen, dass der Beladungszustand ebenfalls einen direkten Einfluss auf das Messergebnis hat, so wird beispielsweise die Gewichtskraft der Beladung der Kontaktkraft bei Abwärtsfahrt entgegenwirken. Damit ist es notwendig einen Schwellwert zur Detektion einer Kollision in Abhängigkeit der Last und deren Position zu variieren, um ein gleichmäßiges Ansprechverhalten für unterschiedliche Beladungszustände zu gewährleisten.

4.2 Kategorisierung und Auswahl der zu analysierenden Größen

Im diesem Schritt werden die physikalischen Auswirkungen einer Quetsch-situation kategorisiert, damit ergibt sich die in Abbildung 4.2 dargestellte Baumstruktur.

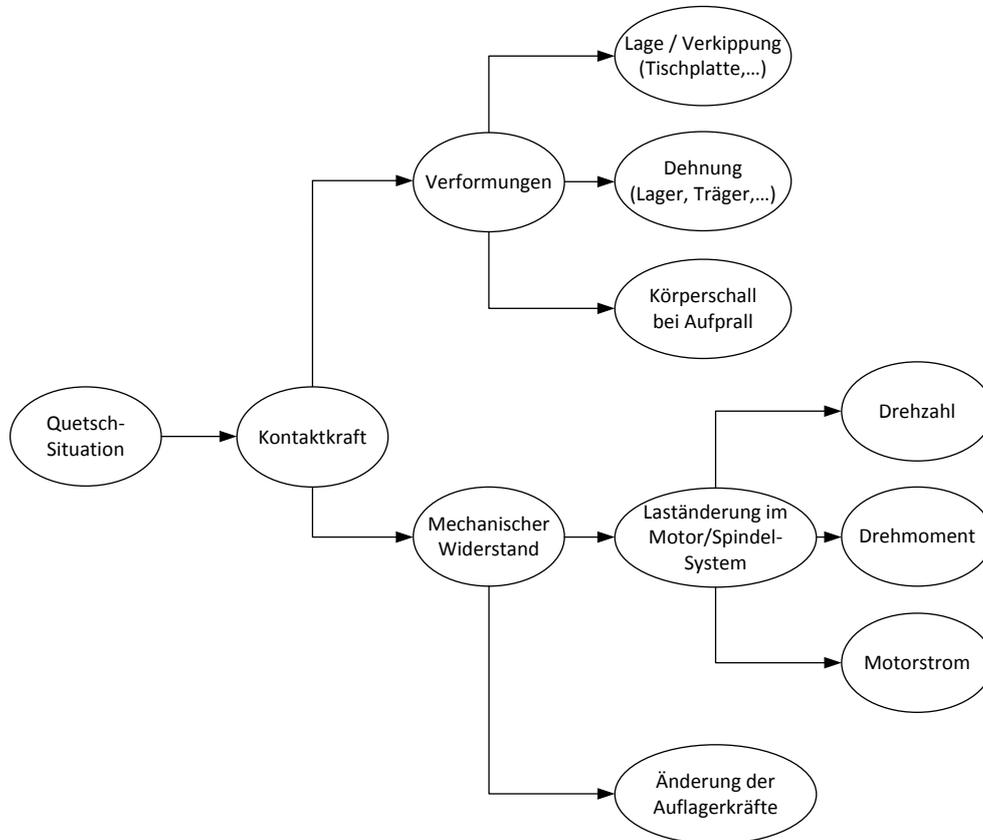


Abbildung 4.2: Physikalische Auswirkungen einer Quetschung; die bei der Kollision auftretende Kontaktkraft ruft einerseits einen mechanischen Widerstand hervor, andererseits verursacht sie Verformungen an verschiedenen Systemkomponenten

Die Grafik kann so gedeutet werden, dass das Einwirken einer Kontaktkraft sowohl Verformungen als auch einen mechanischen Widerstand hervorruft. Verformungen können sich, wie bereits erläutert, als Lageänderung der Tischplatte, aber auch als Dehnungen und Stauchungen an mechanischen Komponenten äußern. Die Verformungen werden nicht nur durch die Kontaktkraft, sondern auch zu einem hohen Maß durch die Beladung des Tisches beeinflusst. Dies wirkt sich in erster Linie auf die Auslenkung und das Zeitverhalten der beeinflussten physikalischen Größen aus. Wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt wird, ist das Kippverhalten eines beladenen Tisches anders als bei einem unbeladenen Tisch, wobei eine Änderung entweder weniger stark oder auch zeitlich versetzt eintreten kann. In weiterer Folge werden Verfahren, die auf dem Messen von Verformungen beruhen, deshalb als **indirekte Verfahren** zur Bestimmung einer Kontaktkraft bezeichnet. Der Stand der Technik lässt den Schluss zu, dass von den Anbietern für Steuerungstechnik für höhenverstellbare Bürotische bereits sehr ausführliche Forschungen bezüglich der Nutzung von Dehnungen an Lagern und Trägern durchgeführt wurden, einige Ansätze wurden von Mitbewerbern

außerdem patentrechtlich geschützt. Daher werden in weiterer Folge der Diplomarbeit indirekte Verfahren auf Basis der Lageänderung der Tischplatte und die in [7] vorgestellte Körperschallmessung untersucht.

Der mechanische Widerstand steht ursächlich im Zusammenhang mit der Kontaktkraft, sodass die Verfahren, die hier eingeordnet werden, als **direkte Verfahren** zur Bestimmung einer Kontaktkraft bezeichnet werden. Im Zuge der Diplomarbeit werden die Änderung der Auflagerkräfte und die Änderung des Motorstroms als direkte Verfahren weiter behandelt.

5. Messtechnische Erfassung der ausgewählten Größen

Mit den nun bekannten Auswirkungen einer Quetschung und der Festlegung, welche Verfahren untersucht werden sollen, müssen nun geeignete Messprinzipien zur Erfassung der physikalischen Größen ausgesucht werden.

5.1 Messprinzipien zur Kraftmessung

Um die Auflagerkräfte zu messen und in weiterer Folge auf die Kontaktkraft zu schließen, muss die nichtelektrische Größe Kraft, beispielsweise mit den in Abbildung 5.1 gezeigten Prinzipien, gemessen werden.

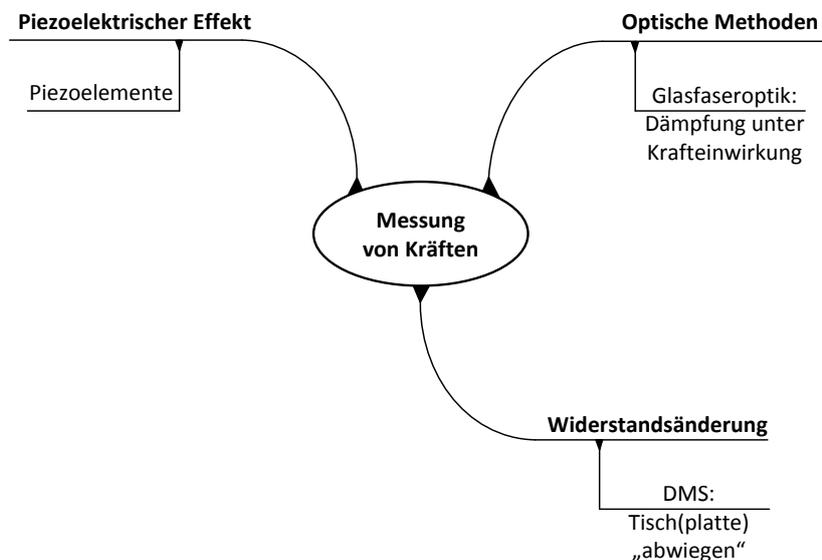


Abbildung 5.1: Messung von Kräften

5.1.1 Dehnungsmessstreifen

Da im Bereich elastischer Verformungen eine direkte Proportionalität zwischen Dehnung und Kraft vorhanden ist, das sogenannte Hook'sche Gesetz, kann die Messung einer Dehnung genutzt werden um auf eine Kraft zu schließen. Dieses Prinzip wird bei DMS genutzt, welche oftmals auf speziell ausgelegte Wägezellen aufgebracht werden. Je nach Anordnung auf dem sich verformenden Objekt und je nach Aufbau der DMS können unterschiedliche Belastungen wie Zug, Druck, Biegung, Scherung oder Torsion gemessen werden. Die Auswertung erfolgt im

Allgemeinen unter Zuhilfenahme von Brückenschaltungen, wobei eine Vollbrücke, bestehend aus vier, auf dem Objekt angeordneten DMS, die besten Ergebnisse liefert. Dadurch ist die Kompensation von Störeinflüssen möglich, wie beispielsweise der temperaturbedingten Dehnung der DMS. Die Querempfindlichkeit bezüglich Belastungsarten, die nicht erfasst werden sollen, kann durch den Aufbau des DMS minimiert werden. Diese Sensoren eignen sich gleichermaßen für die Messung statischer und dynamischer Kräfte. ([8], Kapitel 7.2.2)

5.1.2 Piezoelektrischer Effekt

Wird ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer, der eine kristalline Struktur aufweist, mit einer äußeren Kraft belastet, entsteht eine Ladungstrennung an der Kristalloberfläche. Über die Ausrichtung der Schnittflächen gegenüber den Kristallachsen kann eingestellt werden, ob der Sensor beispielsweise auf Zug-Druck-Beanspruchung oder Schubkräfte empfindlich ist. ([8], Kapitel 7.3.1.4) Es muss ein Ladungsverstärker eingesetzt werden um aus der Ladung ein Spannungssignal zu erzeugen. Da im Bereich einiger Millisekunden ein Ladungsausgleich im Kristall stattfindet ist das Messen statischer Kräfte nicht möglich.

5.1.3 Optische Methoden

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Glasfaseroptik. An einem Ende einer Glasfaserleitung wird ein optischer Transmitter, am anderen ein Empfänger angefügt. Bei Quetschung der Leitung kommt es zu einer messbaren Dämpfung der optischen Leistung. Thema der Arbeit [9] ist der Entwurf eines Kraftsensors basierend darauf, dass eine gequetschte Glasfaser ein eingespeistes Lichtsignal in seiner optischen Leistung dämpft. Konstruktiv wird der Kraftsensor für einen Greifarm eines Roboters ausgelegt. Der Aufbau wird als Low-Cost-Lösung mit guter Auflösung und Stabilität bezeichnet, jedoch muss eine Re-Kalibrierung bei jeder Bewegung durchgeführt werden um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Aufgrund des optischen Aufbaus ergibt sich der Vorteil, dass die Messung nicht von elektro-magnetischen Feldern beeinflusst wird. Die Autoren in [10] zeigen, wie ein Schalter an einem Bedienfeld im Cockpit eines Flugzeugs mit optischen Methoden aufgebaut werden kann. Diese binäre Operation ist nur dann interessant, wenn nur eine Entscheidung „Kraft über/unter Schwellwert“ nötig ist. In der vorgestellten Anwendung wird ein Biegestab von einem Schaltelement gebogen, eine Glasfaser am Biegestab erfährt ebenfalls eine Dehnung oder Stauchung. Im Vergleich zu [9] wird hier jedoch Weißlicht-Interferometrie verwendet. Da hierfür jedoch 2 Interferometer nötig sind, ist der Aufbau vergleichsweise komplex.

5.1.4 Auswahl

Von den drei angeführten Vertretern wird für die Experimente der Einsatz von Dehnungsmessstreifen vorgeschlagen, die in Wägezellen integriert sind. Optische Methoden disqualifizieren sich in diesem Fall aufgrund der Verfügbarkeit, der Komplexität und des Preises. Piezoelektrische Elemente eignen sich im Allgemeinen nicht für die Messung statischer Kräfte, da jedoch zu erwarten ist, dass die zu messenden Kräfte Signalkomponenten mit niedriger Frequenz enthalten, kann dieses Messprinzip nicht eingesetzt werden.

5.2 Messprinzipien zur Lagemessung

Um die Lage der Tischplatte bzw. deren Verkippung messtechnisch zu erfassen, sind beispielsweise die in Abbildung 5.2 gezeigten Prinzipien geeignet.

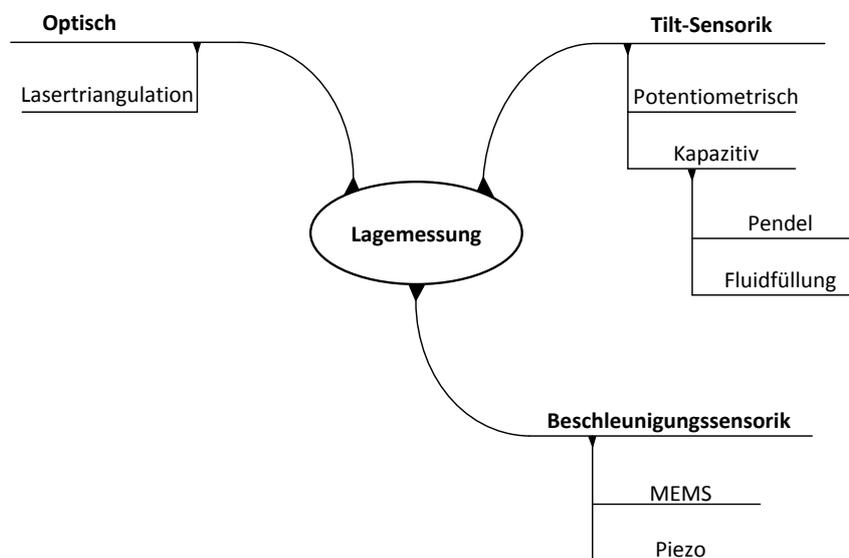


Abbildung 5.2: Lagemessung

5.2.1 Tilt-Sensorik

In die Klasse der Tilt-Sensoren fällt auch der bereits im Patent [6] eingesetzte flüssigkeitsgefüllte Kondensator. Prinzipiell nutzen diese Sensoren die Ausrichtung eines Objektes, zum Beispiel eines Fluides oder Pendels, im Gravitationsfeld der Erde. In der Arbeit [11] werden überblicksmäßig mehrere Sensortechnologien vorgestellt. Zusätzlich wird ein gasgefüllter Aufbau vorgeschlagen, der sehr ähnlich zur flüssigkeitsgefüllten Kapazität aus [6] ist.

5.2.2 Lasertriangulation

Das Grundprinzip eines Lasertriangulationssensors ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Aus dem Sensor tritt ein Laserstrahl aus, der auf das Messobjekt trifft. Je nachdem wie groß die Entfernung zwischen der belichteten Oberfläche und dem Strahlaustritt ist, wird der Lichtpunkt unter einem anderen Betrachtungswinkel von einem optischen Sensor, beispielsweise einer CCD-Zeile betrachtet. Das bedeutet, dass sich mit dem Objektabstand die Position der belichteten Stelle der CCD-Zeile ändert. Mit dem bekannten Abstand von Strahlaustritt und

optischem Sensor und der Information, an welcher Stelle der Sensorzeile sich das Belichtungsmaximum befindet, kann über Winkelfunktionen der Abstand des Messobjekts vom Strahlaustritt bestimmt werden.

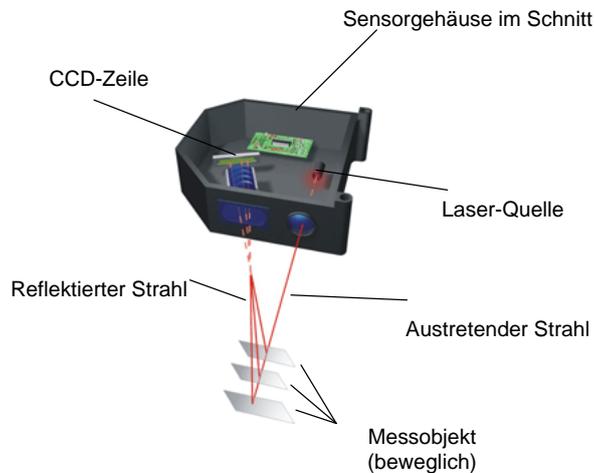


Abbildung 5.3: Funktionsweise eines Lasertriangulationssensors; der austretende Laserstrahl wird vom Messobjekt reflektiert, dieser Strahl belichtet eine CCD-Zeile; die Belichtungsposition und eine Triangulation ermöglichen eine sehr genaue Berechnung des Objektabstands zum Sensor

Ein solcher Aufbau alleine kann noch nicht zur Lagemessung eines Objektes wie der Tischplatte eingesetzt werden, denn um die Lage einer Ebene im Raum zu bestimmen ist die Vermessung von mindestens 3 Punkten nötig. Der Einsatz im Feld ist aus verschiedenen Gründen nicht möglich, beispielsweise da der Strahlweg unterbrochen werden kann und damit das Messergebnis verfälscht wird. Nicht zuletzt aufgrund des hohen Preises der Sensoren eignen sich diese optischen Messsysteme nicht zum Betrieb eines Kollisionsdetektors, jedoch kann die hochgenaue Messung im Labor als Referenz für weitere Quetschschutzeinrichtungen dienen, die als Grundlage die Verkipfung der Tischplatte haben.

5.2.3 Beschleunigungssensorik

Mit linearen Beschleunigungssensoren ist es möglich, entlang einer oder mehrerer Raumachsen lineare Beschleunigungen zu messen. Durch Doppelintegration des Beschleunigungssignals kann ein Wegprofil gewonnen werden, wobei zu erwarten ist, dass Probleme wie Sensordrift oder –offsets die Ermittlung des Weg-Zeit-Verlaufs negativ beeinflussen. Zwei typische Vertreter dieser Sensoren sind Piezo- und MEMS-Beschleunigungssensoren. Aus der Beschleunigung können auch abgeleitete physikalische Größen bestimmt werden. So zeigen beispielsweise die Autoren der Arbeiten [12] und [13] den Modellierungsprozess, um aus den Sensorsignalen eines Beschleunigungssensors auf MEMS-Basis die Verkipfung eines Objekts im Raum zu bestimmen.

Piezo-Beschleunigungssensoren können als Masse-Feder-System aufgefasst werden, wobei dessen Schwingungen in der kristallinen Struktur nach dem piezoelektrischen Effekt eine Ladungstrennung verursachen, welche mit einem Ladungsverstärker in ein zur Beschleunigung proportionales Spannungssignal

umgesetzt werden kann. Ähnlich wie bei piezoelektrischen Kraftaufnehmern können keine statischen Komponenten, wie beispielsweise die Erdbeschleunigung, gemessen werden. Mit mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) können Sensoren aufgebaut werden, mit denen Beschleunigungen entlang der drei Raumachsen gemessen werden können. Es handelt sich dabei um Strukturen auf einem Mikrochip, die beim Fertigungsprozess zum Beispiel durch Unterätzen als freihängende Stege ausgeformt werden können. Diese stellen, wie im makroskopischen Fall, Masse-Feder-Systeme dar. Auf die Beschleunigung kann dann zum Beispiel durch Kapazitätsmessung der freihängenden, schwingungsfähigen Stege gegen eine feste Gegenelektrode geschlossen werden.

5.2.4 Auswahl

Wie in Kapitel 5.2.2 erläutert, eignet sich die Kombination von 3 Lasertriangulationssensoren zur Rekonstruktion der Tischplattenebene als genaue Referenz für weitere Methoden, die auf der Verkippung der Tischplatte aufbauen, daher werden diese Sensoren für den Prüfstand verwendet. Da Tilt-Sensorik einerseits patentrechtlich geschützt ist und andererseits, wie die Analyse des Patents [6] zeigt, keinen Detektor ermöglicht, der auf geringe Kontaktkräfte anspricht, werden die in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Sensoren nicht zur weiteren Analyse vorgeschlagen. Der Einsatz von Beschleunigungssensoren ermöglicht prinzipiell ebenfalls die Bestimmung der Lage eines Objektes im Raum, daher soll in den Experimenten gezeigt werden, ob eine, im Vergleich zu den Lasertriangulationssensoren, günstigere Variante geeignet ist, um Kollisionen zu detektieren.

5.3 Messen von Laständerungen

Um Laständerungen im Antriebssystem zur Detektion von Quetschungen auszunutzen, werden die Methoden aus Abbildung 5.4 vorgeschlagen.

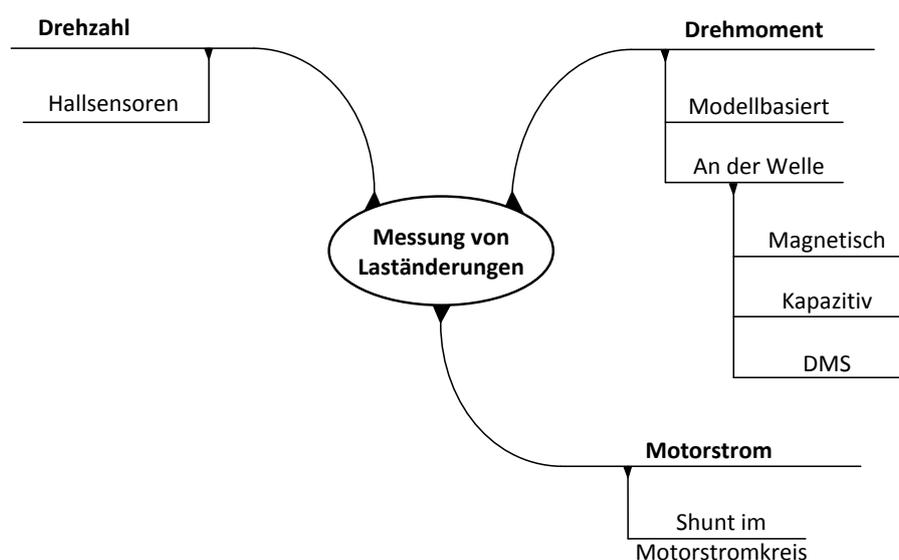


Abbildung 5.4: Messung von Laständerungen

5.3.1 Motorstrommessung und Drehzahlmessung

Die Drehzahl und die Stromaufnahme des Motors werden bereits von der Motorsteuerung gemessen, denn diese Größen sind für die Regelung der Antriebe relevant. Die Drehzahl wird mit zwei differentiellen Hallsensoren pro Motorwelle gemessen, wodurch ein Signal mit 2 Peaks pro Umdrehung entsteht. Die Motorsteuerung nimmt eine Impulszählung und die Berechnung der Drehzahl vor. Der Motorstrom wird mit einem Shunt im Motorstromkreis gemessen. Der zum Strom proportionale Spannungsabfall wird nach entsprechender Signal-konditionierung dem A/D-Umsetzer des Mikrocontrollers der Steuerungseinheit zur Verfügung gestellt.

5.3.2 Drehmomentmessung

Wie aus Abbildung 5.4 hervorgeht, werden Drehmomentmessungen an der Welle, aber auch modellbasierte Varianten vorgeschlagen, die grundsätzlich auf den in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Motorstrom- und Drehzahlmessungen basieren. Mit den Mitteln der Regelungstechnik ist es möglich, beispielsweise einen Zustandsbeobachter zu modellieren, der aus dem Motorstrom und der Drehzahl das Drehmoment des Motors berechnet. Dieser Ansatz dient in den Arbeiten [4] und [5] als Ausgangspunkt für einen Detektor, der eine Reaktion auf Quetschungen von Objekten mit elektrischen Fensterhebern ermöglicht.

Das Drehmoment kann auch direkt an der Welle mit geeigneten Aufnehmern gemessen werden. Dabei kommen DMS, sowie kapazitive und magnetische Aufnehmer zum Einsatz. Artikel [14] beschreibt, wie mit Dehnungsmessstreifen an einer Welle das Drehmoment bestimmt werden kann, praktisch angewendet wird dies an einer Schiffsantriebswelle. Die Autoren präsentieren in [15] die elektrische Schaltung für einen Aufbau, der mit der Konfiguration aus [14] vergleichbar ist. Unterschiede ergeben sich in der Umsetzung der Sensorversorgung und der Signalübertragung von der rotierenden Welle zu einem feststehenden Punkt in der Umgebung, so kommen beispielsweise Schleifringssysteme oder Funkübertragungen zum Einsatz. Der Einsatz eines kapazitiven Messaufbaus zur Drehmomentmessung wird in mehreren Artikeln vorgestellt. In [16] wird ein kapazitiver Aufnehmer auf eine Welle aufgeklebt, und bildet mit einer Spule zur induktiven Kopplung mit dem feststehenden Teil einen Schwingkreis, dessen Resonanzfrequenz vom Drehmoment abhängt. Die Arbeit [17] befasst sich mit einer weiteren kapazitiven Methode, bei der mehrere, versetzt an der Welle angebrachte Elektroden kapazitiv mit einer Elektrode am feststehenden Teil gekoppelt sind. Neben der kapazitiven gibt es auch eine magnetische Methode, die den magnetoelastischen Effekt ferromagnetischer Materialien ausnützt. Diese wird in [18] erläutert. Es wird ausgenützt, dass das Einwirken eines äußeren Drehmoments die magnetischen Eigenschaften der Welle, die Permeabilität, und die Hysterese, messbar ändert.

5.3.3 Auswahl

Experimentell wird im Rahmen der Diplomarbeit die Eignung der Motorstrommessung zur Detektion von Laständerungen durch Quetschungen untersucht. Diese ist bereits als Shunt mit Signalkonditionierung und A/D-Umsetzung in der Motorsteuerung implementiert.

6. Entwicklung eines Prüfstands

In Kapitel 4 wurde analysiert, welche physikalischen Auswirkungen die Kollision des Tisches mit einem Hindernis hat, in weiterer Folge wurde in Kapitel 5 aufgelistet, wie diese Größen messtechnisch erfasst werden können und welche Sensoren für die Experimente gewählt werden. Diese Sensoren in Kombination mit den nötigen Datenerfassungssystemen werden beim Bau eines Prüfstands benötigt, mit dem die Experimente reproduzierbar durchgeführt werden können. Der Bau des Prüfstands und die Messketten werden in diesem Kapitel erklärt, zusätzlich wird gezeigt, wie die zeitliche Synchronisierung aller Messungen und die Wahl der Abstraten durchgeführt werden. Dieser Prüfstand wird in den Kapiteln 7 und 8 dazu verwendet, die ausgewählten direkten und indirekten Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft mit reproduzierbaren Experimenten zu analysieren und zu klären, ob sie sich zur Detektion von Kollisionen eignen.

Das in Abbildung 6.1 gezeigte Blockschaltbild zeigt, welche Sensoren verwendet werden und wie sie mit den eingesetzten PCs zur Messdatenerfassung verbunden werden.

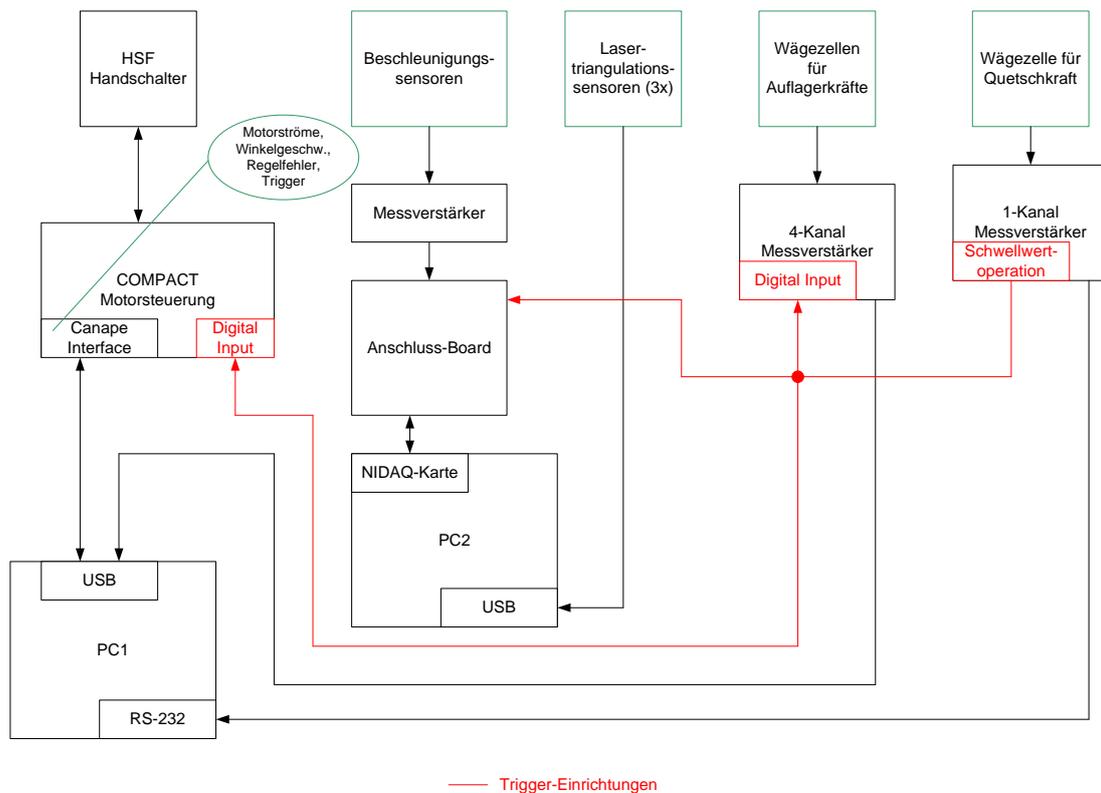


Abbildung 6.1: Blockschaltbild der Messeinrichtungen des Prüfstands; es werden zwei PCs zur Datenerfassung verwendet und die Messungen werden zueinander synchronisiert

Der vorgestellte Prüfstand ermöglicht eine Variation von Tischbeladung und gequetschten Objekten, die Variation dieser Parameter ist nötig um die Leistungsfähigkeit der Verfahren in unterschiedlichen Situationen zu evaluieren. Nach Abschluss jedes einzelnen Experiments werden die Daten auf den PCs gespeichert. Anschließend werden alle Dateien, die zu einem Experiment gehören, in Matlab geöffnet, geeignet formatiert und in einer gemeinsamen *.mat-Datei gespeichert.

6.1 Wägezellen und DMS-Messverstärker zur Messung der Auflagerkräfte

Für die Messung der Auflagerkräfte werden vier Wägezellen mit DMS zwischen den Tischbeinen und dem Boden platziert. Oberhalb und unterhalb der S-förmigen Zellen dient je eine Stahlplatte als einwertiges Auflager, diese Konstruktion beeinflusst das Kippverhalten des Tisches im Quetschfall nicht. In Abbildung 6.2 wird dieser Aufbau für die zwei Auflager eines Tischbeines gezeigt. Die Gewichte der oberen Platten und Schrauben müssen in der Gewichtsmessung berücksichtigt und von Messwerten abgezogen werden, da sie einen konstanten Offset darstellen.



Abbildung 6.2: Wägezellen zur Gewichtsmessung unter dem Ausleger des teleskopartigen Tischbeins

In die Wägezellen sind DMS-Vollbrücken integriert, die Brücken-Verstimmungsspannung kann mit einem Messverstärker gemessen und in eine Kraft umgerechnet werden. Eine DMS-Vollbrücke wird über zwei Anschlüsse gespeist und zwei weitere Anschlüsse für die Brücken-Diagonalspannung werden als Ausgänge genutzt. Typischerweise ist der Kennwert einer Wägezelle deren Empfindlichkeit bei Nennlast (eng. „output at rated load“, „rated output“), die in mV/V (Brückenverstimmung bezogen auf Speisung) angegeben wird ([19]). Die verwendeten Wägezellen sind auf eine Nennlast von 100 kg und den dazugehörigen, gängigen Kennwert 2 mV/V ausgelegt. Die Speisespannung soll laut Hersteller zwischen 9 und 12 VDC liegen ([20]).



Abbildung 6.3: S-förmige Wägezelle (Quelle: [20])

An den Messverstärker Spider8 von HBM können, wie in Abbildung 6.4 gezeigt wird, die vier Wägezellen angeschlossen werden. Zusätzlich wird ein Digitaleingang genutzt, um in weiterer Folge die Synchronisierung mit anderen Messaufgaben zu ermöglichen. Die Abtastrate der Eingänge kann auf bis zu 9,6 kHz eingestellt werden und die Verbindung zu einem PC wird über einen USB-Parallelport-Konverter vorgenommen. Über die von HBM bereitgestellte Software Catman werden die Eingänge des Spider8 kalibriert und in weiterer Folge die Messwerte aufgenommen und gespeichert. Dadurch entstehen für die eingestellte Messzeit und Abtastrate 5 Datenvektoren (4 Wägezellen + Trigger), diese 5xN

Datenmatrix wird in ein ASCII-File gespeichert, das später in Matlab eingelesen werden kann.

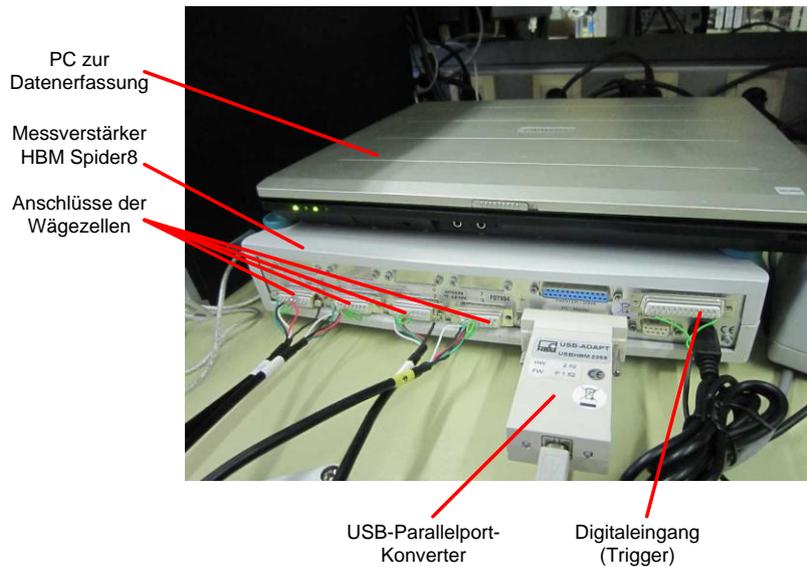


Abbildung 6.4: Spider8 Messverstärker und PC zur Datenerfassung

6.2 Messung und Einleitung von Kontaktkräften

Um eine Kollision zu simulieren und damit eine Kontaktkraft in das Tischsystem einzuleiten, muss dem Tisch während der Hubbewegung ein Hindernis entgegengestellt werden. Dazu wird die in Abbildung 6.5 gezeigte Hubsäule verwendet, die Kontaktkraft kann mit der Wägezelle aufgenommen werden, die zusammen mit einem Schaumstoffprüfling (siehe Kapitel 6.3) auf der massiven Lineareinheit platziert wird. Durch Verstellen des Antriebs (Anlegen einer Gleichspannung an den Verstellmotor und Einstellung der Höhe) kann in unterschiedlichen Höhen eine Quetschung simuliert werden.



Abbildung 6.5: Wägezelle zur Messung der Kontaktkraft; die Wägezelle steht auf einer massiven, höhenverstellbaren Säule; ein Schaumstoffprüfling kann zur Simulation von Quetschungen mit weichen Objekten eingesetzt werden

Um die auftretende Kontaktkraft über die Zeit aufzunehmen, wird die Wägezelle an den in Abbildung 6.6 dargestellten 1-Kanal-Messverstärker AED9101b von HBM angesteckt.



Abbildung 6.6: Messverstärker AED9101b von HBM; der Messverstärker wird zur Messung der Kontaktkraft mit der in Abbildung 6.5 gezeigten Wägezelle verbunden

Zur Datenerfassung wird ein PC mit serieller Schnittstelle eingesetzt, da die Daten über RS232 aus dem Messverstärker ausgelesen werden können. Die Software AED Panel von HBM ist in der Lage bis zu 4096 Messwerte bei einer maximalen Abtastrate von 600 Hz zu schreiben. Die erstellten Dateien haben ein Textdateiformat und enthalten neben den Messwerten einige Zusatzinformationen, dieser Overhead muss vor der weiteren Verwendung in Matlab aus der Datei entfernt werden.

6.3 Auswahl der Prüflinge

Mit Schaumstoffprüflingen unterschiedlicher Härtegrade können Kollisionen mit verschiedenen Objekten simuliert werden. Das Auffahren auf weichere Prüflinge ist aus Erfahrung des Auftraggebers für ein Quetschschutzsystem schwieriger in der Handhabung als das Auffahren auf ein hartes Objekt (anderer Tisch, Rollcontainer, etc.).

6.4 Lasertriangulationssensoren

Lasertriangulationssensoren werden in den Experimenten eingesetzt um hochgenau das Kippen der Tischplatte unter Einfluss einer Kontaktkraft zu messen. Dazu werden drei Sensoren so positioniert, dass die in Abbildung 6.7 angedeuteten Punkte vermessen werden können. In dieser Konfiguration ist es möglich, die Tischebene zu rekonstruieren. Mit den Lasertriangulationssensoren ILD1402-200 von Micro-Epsilon wird an drei Punkten der Verfahrweg der Tischplatte gemessen, der Messbereich der Sensoren beträgt 200 mm (von 60 mm bis 260 mm Entfernung vom Strahlaustritt), die Auflösung beträgt bei einer Abtastrate von 1,5 kHz zwischen 13 und 100 μm .

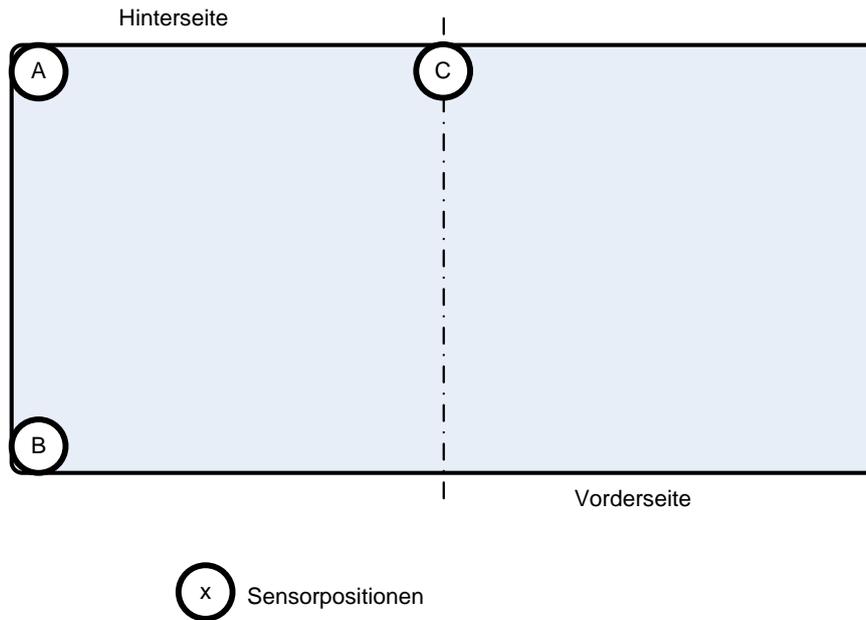


Abbildung 6.7: Anordnung der Sensoren zur Rekonstruktion einer Ebene (Grundriss der Tischplatte)

Die Sensoren sind mit einer RS422-Schnittstelle ausgestattet, und können über einen USB-Konverter mit einem PC verbunden werden. Somit ergibt sich der in Abbildung 6.8 gezeigte Anschlussplan für alle drei Sensoren.

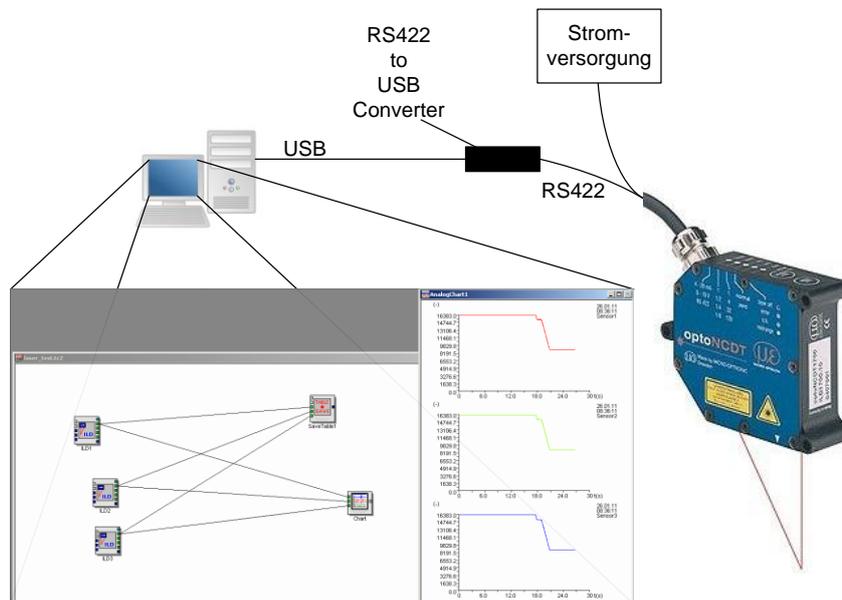


Abbildung 6.8: Blockschaltbild der Verbindung der Lasertriangulationssensoren mit dem PC

Micro-Epsilon stellt die DAQ-Software iConnect7 zur Verfügung, dieses Programm erlaubt es, die Werte der drei Sensoren synchron in den PC einzulesen und in einem Binärdateiformat zu speichern. Eine derartige Datei kann in Matlab geöffnet werden und die Datenmatrix, die in diesem Fall die Dimension $3 \times N$ hat, kann weiter verarbeitet werden. Der Sensor sendet an den PC Daten in einem ganzzahligen Format, diese Rohdaten können in Matlab in einen Abstand in

Millimeter umgerechnet werden. Folgende Formel kann [21] entnommen werden und wird zur Umrechnung verwendet:

$$x[\text{ in mm}] = \left(digital_{OUT} \cdot \frac{1.02}{16368} - 0.01 \right) \cdot 200 \text{ mm} \quad (1)$$

Der Messbereich der eingesetzten Sensoren beträgt 200 mm und dient in der Formel als skalierender Faktor. Ein weiterer Vorteil der nachträglichen Umrechnung der Rohdaten in Millimeter ist, dass digitale Fehlercodes gleich wie Messwerte ausgegeben werden, und mit Abfragen im auswertenden Programm eine entsprechende Fehlerbehandlung durchgeführt werden kann. Der eigentliche Messbereich umfasst die Werte 161 bis 16207, die Fehlercodes werden in Tabelle 6.1 zusammengefasst:

Wert (Fehlercode)	Fehler
16370	Kein Objekt erkennbar
16372	Objekt zu nah am Sensor
16374	Objekt zu weit vom Sensor entfernt
16376	Messobjekt nicht auswertbar
16380	Messobjekt bewegt sich auf Sensor zu
16382	Messobjekt bewegt sich vom Sensor weg

Tabelle 6.1: Fehlercodes der Lasertriangulationssensoren ILD1402-200 (aus [21])

Um die Lasertriangulationssensoren zu montieren wird ein bereits bestehender Aufbau des EMT verwendet. Es handelt sich dabei um einen Rahmen, der aus Item-Profilen zusammengesetzt ist, und so über den Tisch gestellt ist, dass die Tisch-Hubbewegung uneingeschränkt durchgeführt werden kann. Mit Nutensteinen und Adapterplatten können die Sensoren fixiert werden, sodass sie unterhalb der Tischplatte ausgerichtet werden können und sich der Abstand zwischen Strahlaustritt und den vermessenen Punkten bei der Hubbewegung verändert.



Abbildung 6.9: Lasertriangulationssensor am Item-Profilrahmen montiert

Um die Strahlen der Lasertriangulationssensoren auszurichten, werden die Sensoren, die auf dem in Abbildung 6.9 gezeigten Item-Profilrahmen montiert sind mit einer Wasserwaage ausgerichtet, die zu vermessenden Positionen auf der

Tischplatte werden außerdem markiert. Damit ist sichergestellt, dass bei jedem Experiment immer dieselben Positionen vermessen werden. Der Messbereich der Sensoren ist im Vergleich zum maximal möglichen Verfahrenweg des Tisches relativ gering, daher muss die Anordnung so abgestimmt werden, dass der interessante Bereich, also die Umgebung der Quetschung, vermessen werden kann.

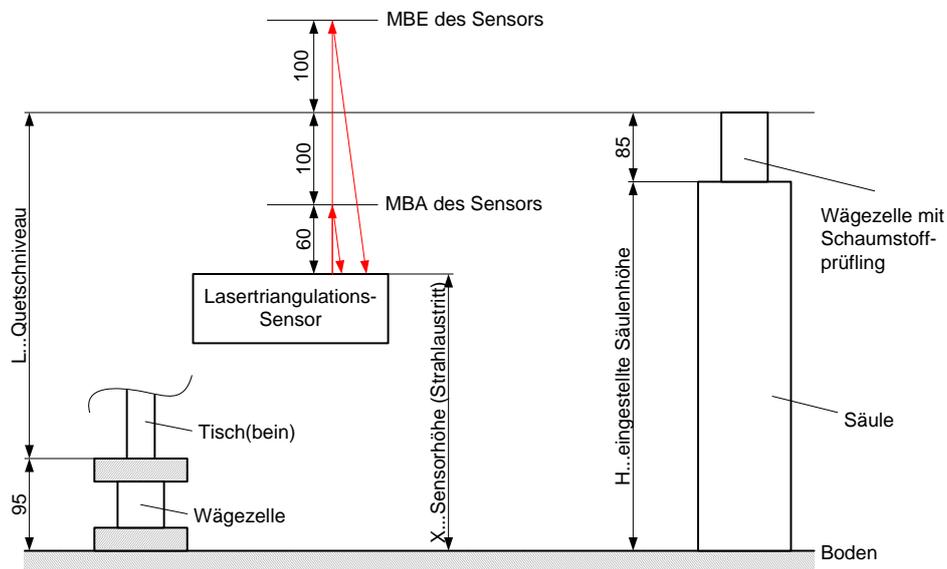


Abbildung 6.10: Höheneinstellung für die Lasertriangulationssensoren; die Montagehöhe der Sensoren wird so eingestellt, dass eine Messung 100 mm über und unter der Kollisionshöhe möglich ist; die Höhe der Sensoren muss dazu auch zur Höhe des Hindernisses (vgl. Abbildung 6.5) abgestimmt werden

Anhand der Skizze in Abbildung 6.10 kann die Montagehöhe X der Sensoren, ausgehend vom Messbereichsanfang (MBA) und Messbereichsende (MBE), so eingestellt werden, dass der Tisch 100 mm vor der Quetschung in den Messbereich der Sensoren eintritt. Dazu wird das Quetschniveau L vorgegeben, es entspricht der Höhendifferenz zwischen der Tischplattenunterkante und den Bodenkontaktpunkten der Tischbeine. Außerdem kann daraus die Höhe der Säule eingestellt werden, auf die der Prüfling für die Kollision gestellt wird.

$$X = L - 65 \quad (2)$$

$$H = L + 10 \quad (3)$$

Sollen die Tischbeine zum Zeitpunkt der Quetschung $L = 750$ mm ausgefahren sein, ergeben sich somit eine Einstellhöhe $X = 685$ mm für die Sensoren und $H = 760$ mm für die Säule auf der der Prüfling steht.

6.5 Beschleunigungssensoren

Es werden am EMT verfügbare piezoelektrische Beschleunigungssensoren verwendet, um durch Doppelintegration der Beschleunigung auf ein Wegprofil der bewegten Tischplatte zu schließen. Die Sensoren werden auf der Tischplatte platziert und mit einem Messverstärker verbunden, der dem Datenerfassungssystem eine zur Beschleunigung proportionale Spannung liefert. Dies geschieht je nach Sensortyp in bis zu 3 Achsrichtungen. Der Triaxialsensor 317A41 und der einachsige Sensor 353B34 von PCB können Beschleunigungen in einem Frequenzbereich von 1-6500 Hz bzw. 0.7-7000 Hz aufnehmen. Bei einer Empfindlichkeit von 100 mV/g können Beschleunigungen von bis zu 50 g gemessen werden.

Um auch die Eignung von MEMS-Sensoren zu evaluieren wird ein ADXL330 MEMS-Beschleunigungssensor von Analog Devices eingesetzt. Damit können Beschleunigungen von bis zu 3 g mit einer Empfindlichkeit von 300 mV/g gemessen werden. Die Bandbreite beträgt laut Datenblatt 1600 Hz in x- und y-Richtung, sowie 550 Hz in z-Richtung.

Die Sensoren werden je nach Messaufgabe an verschiedenen Positionen angebracht. In Frage kommen dabei beispielsweise die typische Montageposition eines Handschalters oder einer Steuerung, da es denkbar ist, einen Beschleunigungssensor in eines der beiden Produkte zu integrieren. Die Ausgangsspannungen des Messverstärkers werden mit einem National Instruments Anschlussboard und der im PC angeschlossenen NIDAQ-Wandlerkarte in den PC eingelesen. Die Datenerfassung am PC wird mit LabView durchgeführt, alle weiteren Analysen und Berechnungen mit Matlab. Um die Daten in Matlab einlesen zu können, muss eine Matlab-kompatible Binärdatei in LabView geschrieben werden. Abbildung 6.11 zeigt den triaxialen Beschleunigungssensor 317A41. Mit einem speziellen Wachs wird zwischen der Grundplatte des Sensors und der Tischplatte ein Haftschluss mit möglichst geringer Dämpfung hergestellt.

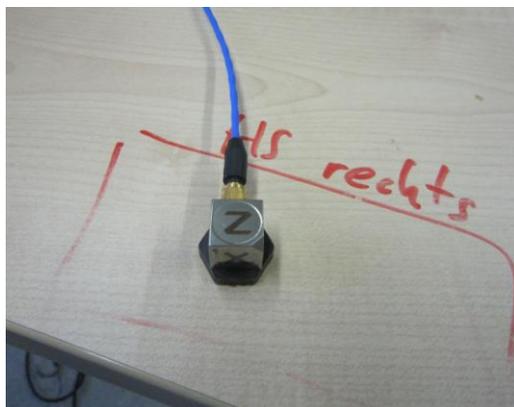


Abbildung 6.11: Triaxialer Beschleunigungssensor 317A41 auf der Handschalterposition rechts vorne; der Sensor wird mit einem speziellen Wachs auf der Tischplatte befestigt

6.6 Messung von Drehzahl und Motorstrom

Das Programm Canape wird derzeit beim Auftraggeber eingesetzt um Messwerte aus der Steuerung zu exportieren und mit einem PC zu visualisieren bzw. zu speichern. Ein Adapterkabel für die Motorsteuerung wird mit einem PC verbunden, auf dem Canape installiert ist. Die Software-Konfiguration des Backends, das ist die Anbindung an die Steuerung und deren Software und Variablen, wird vom Auftraggeber für jede neue Firmware-Version der Steuerung zur Verfügung gestellt. Die Softwarekonfiguration des Frontends, dem die Auswahl der Variablen, die Visualisierung in Canape und der Datenexport in ein Matlab-kompatibles Dateiformat angehören, kann für verschiedene Projekte individuell erstellt werden. Aus der Steuerung können der Motorstrom, die Winkelgeschwindigkeit der Motorwelle, der Regelfehler, sowie ein Triggersignal, das an einen freien Digitaleingang der Steuerung angelegt wird, ausgelesen werden. Da diese Werte an die Zykluszeit des Betriebssystems der Steuerung gebunden sind, kann die Abtaste von 500 Hz nicht verändert werden. Canape ist in der Lage *.mat-Dateien für die weitere Datenverarbeitung zu schreiben.

6.7 Wahl der Abtastraten

Die Abtastraten sollten angemessen gewählt werden um Aliasingeffekte zu vermeiden und andererseits das Datenaufkommen so gering wie möglich zu halten. Tabelle 6.2 zeigt die maximal möglichen Abtastraten für die einzelnen Geräte.

<u>Sensor</u>	<u>Maximal mögliche Abtaste</u>
Beschleunigungssensoren	50 kHz
Lasertriangulationssensoren	1,5 kHz
Wägezellen (Auflagerkraftmessung)	9,6 kHz
Wägezelle (Messung der Kontaktkraft)	600 Hz
Motorströme, Drehzahlmessung, Regelfehler	500 Hz

Tabelle 6.2: Maximal mögliche Abtastraten für die eingesetzten Sensoren

Die Motorströme, die Winkelgeschwindigkeiten und die Regelfehler, die von der Motorsteuerung zur Verfügung gestellt werden, können in ihrer Abtaste nicht verändert werden, da diese durch die Task-Zykluszeit des Echtzeitbetriebssystems der Motorsteuerungsfirmware vorgegeben ist. Die Lasertriangulationssensoren werden mit der maximal möglichen Abtaste von 1,5 kHz betrieben. Alle anderen notwendigen Abtastraten werden vor den eigentlichen Messungen ermittelt. Dazu wird eine Kollision bei maximal möglichen Abtastraten vermessen. Eine nachfolgende Analyse im Frequenzbereich soll dabei helfen, die größten vorkommenden Frequenzen in jedem Signal zu finden und dadurch zu bestimmen, welche Abtastraten nötig sind um diese aufzulösen. Zur Analyse im Frequenzbereich werden Spektrogramme eingesetzt, um den zeitlichen Verlauf der Frequenzspektren darzustellen. Exemplarisch wird die Wahl der Abtaste für

die Beschleunigungssensoren gezeigt, die Vorgangsweise mit den Wägezellen funktioniert analog.

Es wird eine Kollision des Tisches mit einem möglichst harten Objekt durchgeführt. Dabei wird der Beschleunigungssensor so nahe wie möglich an der Stelle der Kollision platziert. Die Quetschung wird an der Unterseite der Tischplatte bei einer Abwärtsfahrt hervorgerufen, der Sensor wird direkt oberhalb der Kontaktstelle auf der Oberseite der Tischplatte montiert. Durch diese Konfiguration wird sichergestellt, dass Dämpfungen die Bewegung bzw. die Schwingung nicht unnötig abschwächen. Der Versuch wird mit einer Abtastrate von 30 kHz durchgeführt, die 3 Zeitsignale der Beschleunigung in x-, y- und z-Richtung des Tisches werden anschließend mittels eines Spektrogramms im Frequenzbereich analysiert. Beispielhaft werden in Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 das Zeitsignal und das Spektrogramm des Beschleunigungssignals in z-Richtung dargestellt. Die Verläufe in anderen Achsrichtungen zeigen ähnliche Verläufe in Zeit- und Frequenzbereich.

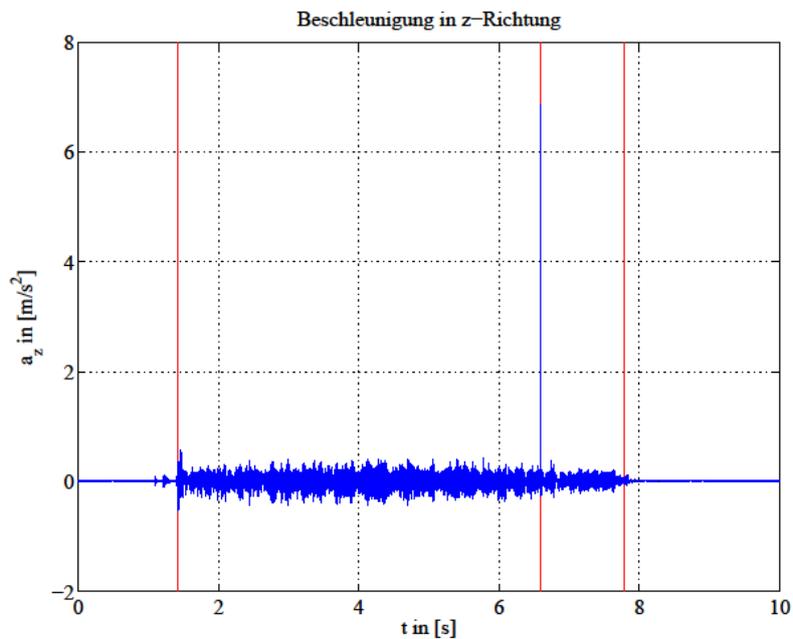


Abbildung 6.12: Zeitsignal des Beschleunigungssensors in z-Richtung bei einer Abtastrate von 30 kHz; die roten, vertikalen Linien deuten (von links nach rechts) den Start-, Kollisions- und Stoppzeitpunkt an

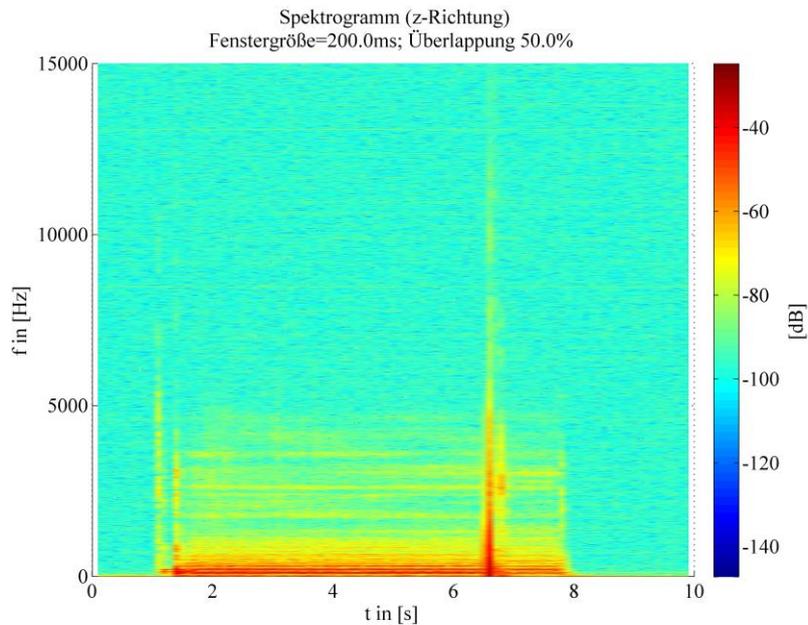


Abbildung 6.13: Spektrogramm (in dB) des Beschleunigungssignals in z-Richtung bei einer Abtastrate von 30 kHz (korrespondierendes Zeitsignal siehe Abbildung 6.12)

Es zeigt sich, dass es keine charakteristischen Frequenzkomponenten über 5 kHz gibt. Für jeden Kanal wird ein Anti-Aliasing Filter mit einer Grenzfrequenz von 10 kHz eingesetzt um Aliasing-Effekte zu vermeiden. Die Abtastrate wird nicht bei der doppelten Grenzfrequenz gewählt, sondern zur Überabtastung auf 30 kHz eingestellt. Die Wahl der Abtastrate kann durch die Filtercharakteristik begründet werden, da der Frequenzgang keinen unendlich steilen Abfall bei 10 kHz aufweist. Abbildung 6.14 zeigt die Filter-Boxen und deren Integration in die Messkette.

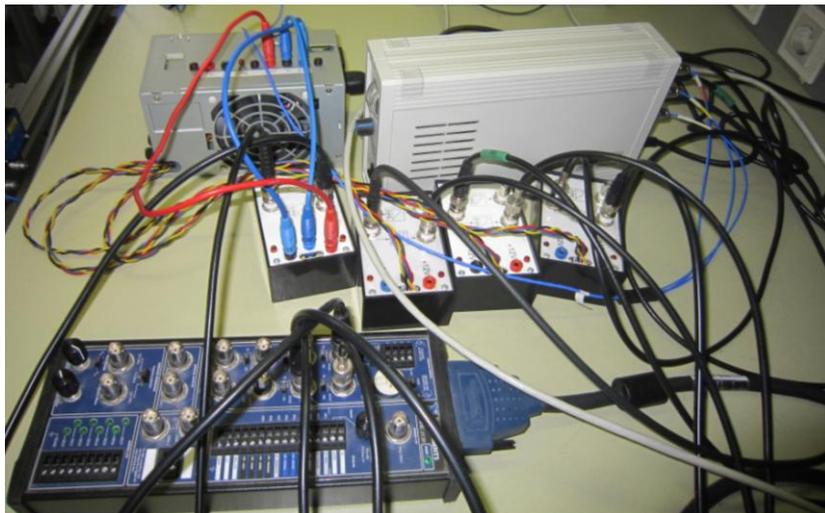


Abbildung 6.14: Anti-Aliasing-Filter mit Stromversorgung, 3-Kanal Messverstärker für die Beschleunigungssensoren und National Instruments Anschlussboard

In Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 werden die Verläufe in Zeit- und Frequenzbereich des Beschleunigungssensors in z-Richtung nach Integration der Filter in die Messkette dargestellt, wobei die Experimente mit gleicher Konfiguration von Sensor und Kollision durchgeführt werden wie zuvor.

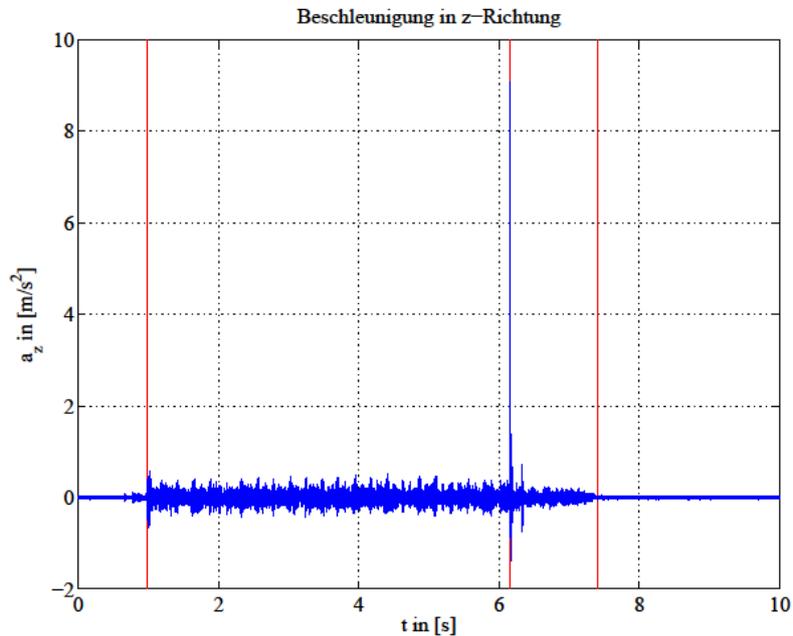


Abbildung 6.15: Zeitsignal des Beschleunigungssensors in z-Richtung bei einer Abtastrate von 30 kHz und unter Verwendung eines Anti-Aliasing-Filters mit 10 kHz Grenzfrequenz; die roten, vertikalen Linien deuten (von links nach rechts) den Start-, Kollisions- und Stopzeitpunkt an

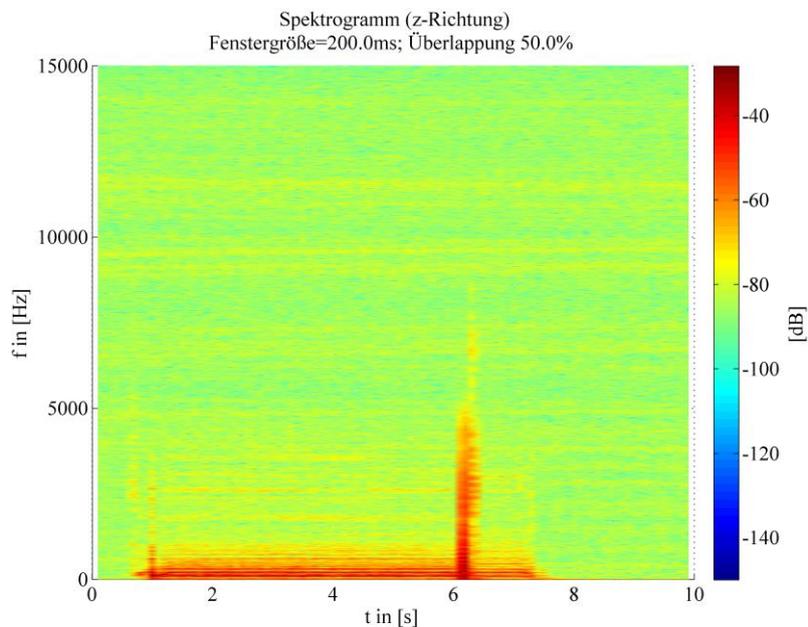


Abbildung 6.16: Spektrogramm (in dB) des Beschleunigungssignals in z-Richtung bei einer Abtastrate von 30 kHz und unter Verwendung eines Anti-Aliasing-Filters mit 10 kHz Grenzfrequenz (korrespondierendes Zeitsignal siehe Abbildung 6.15)

Mit den in Tabelle 6.3 gezeigten Abtastraten werden alle weiteren Experimente durchgeführt:

Sensor	Gewählte Abtastrate
Beschleunigungssensoren	30 kHz
Lasertriangulationssensoren	1,5 kHz
Wägezellen (Auflagerkraftmessung)	2,4 kHz
Wägezelle (Messung der Kontaktkraft)	600 Hz
Motorströme, Drehzahlmessung, Regelfehler	500 Hz

Tabelle 6.3: Gewählte Abtastraten für die eingesetzten Sensoren

6.8 Synchronisierung der Messungen

Der 1-Kanal-Messverstärker AED9101b von HBM besitzt einen Digitalausgang, dessen Pegel an eine, auf die Gewichtsmessung angewendete, Schwellwertoperation mit Schalthysterese gekoppelt ist. Diese Funktion wird in Abbildung 6.17 verdeutlicht.

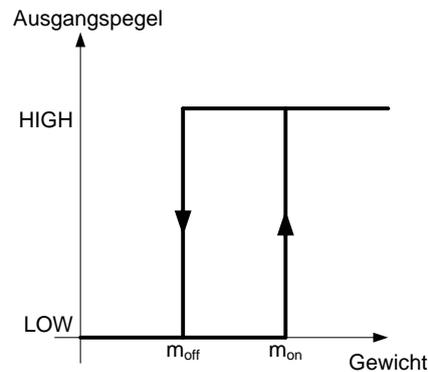


Abbildung 6.17: Schaltverhalten des Digitalausganges; wird auf die Wägezelle eine bestimmte Masse m_{on} aufgelegt steigt der Pegel des Digitalausganges auf High; erst wenn die Masse unter m_{off} sinkt fällt der Pegel auf Low zurück; somit kann eine Schwellwertoperation mit Schalthysterese implementiert werden

Die beiden Werte m_{on} und m_{off} können über die PC-Software AED Panel vorgegeben werden. Wird der Wert m_{off} kleiner als m_{on} gewählt kann eine Schalthysterese implementiert werden. Werden die Werte gleich groß gewählt entfällt die Hysterese. Der Digitalausgang des Messverstärkers wird verwendet um die Synchronisierung aller Messungen zu erreichen. Sobald ein geringer Kraft-Schwellwert überschritten wird, also ein Kontakt zwischen Tischplatte und Prüfling hergestellt ist, wird ein High-Signal an entsprechende Eingänge der anderen Messeinrichtungen angelegt. Im Ruhezustand liegt ein Low-Signal an. Die Triggerung hat 2 Aufgaben: Einerseits werden die Messungen zueinander zeitlich synchronisiert, andererseits kann der genaue Zeitpunkt der Quetschung festgestellt werden.

6.9 Analyse der auftretenden Latenzzeiten

Beim Aufbau des Prüfstands wird abschließend untersucht, ob es Latenzzeiten zwischen den eigentlichen Messeingängen und den Triggereingängen der jeweiligen DAQ-Systeme gibt. Jede Kombination aus Messsignal und Triggersignal wird mit einem geeigneten Experiment auf Latenzzeiten untersucht.

6.9.1 Beschleunigungssensoren

Um die bestmögliche, zeitliche Synchronität zwischen den Beschleunigungsmessungen entlang aller Achsen und dem Triggersignal zu gewährleisten, ist es zweckmäßig alle Signale an Analogeingängen desselben Geräts (derselben Wandlerkarte) bei selber Abtastrate einzulesen. Dadurch kann ebenfalls sichergestellt werden, dass auch alle Messsignaleingänge zueinander synchron sind. Da alle Beschleunigungssensoren und auch das Triggersignal auf einem Anschlussboard Platz finden, kann der zeitliche Versatz durch Anschluss eines Funktionsgenerators an alle verwendeten Eingänge ermittelt werden. Liegt an allen Eingängen dasselbe Signal an, dürfen im Plot keine Phasenverschiebungen auftreten.

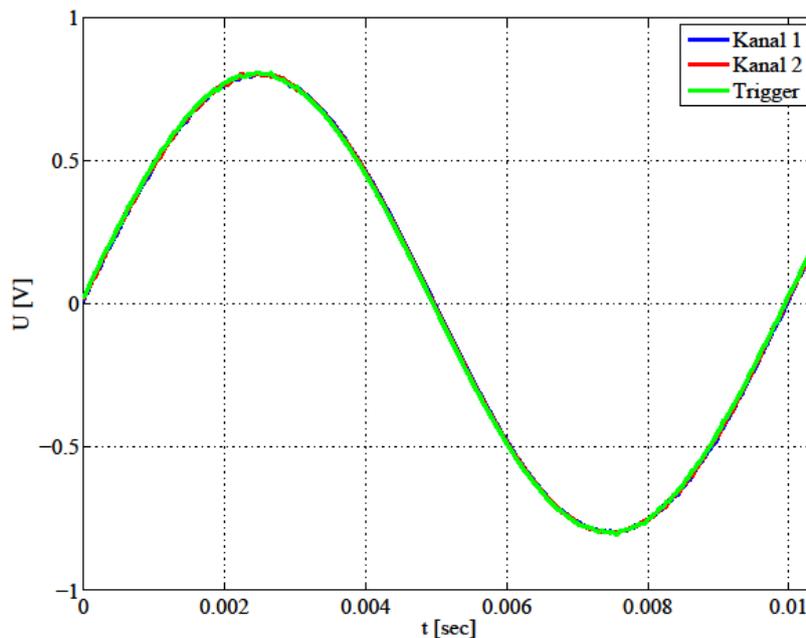


Abbildung 6.18: Plot des Experiments zur Ermittlung der Latenzzeit zwischen den Sensorkanälen und dem Triggerkanal für die Beschleunigungssensoren; Abtastrate: 30 kHz; Signal: Sinus mit 1,6 V Spitze-Spitze und $f=100$ Hz; Darstellung einer Periode; die Signalverläufe zeigen, dass keine Latenzen zwischen den einzelnen Kanälen auftreten

Das Experiment ergibt, wie in Abbildung 6.18 gezeigt wird, dass kein zeitlicher Versatz zwischen den Kanälen und daher auch nicht zur Triggerung auftritt.

6.9.2 Wägezellen und Messverstärker

Beim Betrieb der Wägezellen mit den Messverstärkern ist eine Latenz zwischen den eigentlichen Messsignalen und den Digitalports, die zur Synchronisierung verwendet werden, denkbar. Zusätzlich ist es möglich, dass die vier Wägezellen am Spider8 zueinander zeitlich verschoben sind. Diese Latenzeffekte werden für den HBM Spider8 und den AED9101b vernachlässigt. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da den Wägezellen im Messprogramm keine digitalen Filter nachgeschaltet werden. Diese digitalen Filter rufen durch die Gruppenlaufzeit eine Verzögerung hervor, die die Messsignale der Wägezellen zu den Digitalports verschiebt.

6.9.3 Lasertriangulationssensoren

Aufgrund der Systemarchitektur der Lasertriangulationssensoren ist der Einsatz der Synchronisierung nicht möglich. Einerseits besitzen die Sensoren keinen Triggereingang, andererseits schlägt auch die Kombination der Sensoren mit einem separat eingelesenen Digitaleingang in der DAQ-Software fehl. Dies wurde in einer Versuchsreihe gezeigt, und auf nicht-konstante Latenzzeiten in der Messkette zurückgeführt.

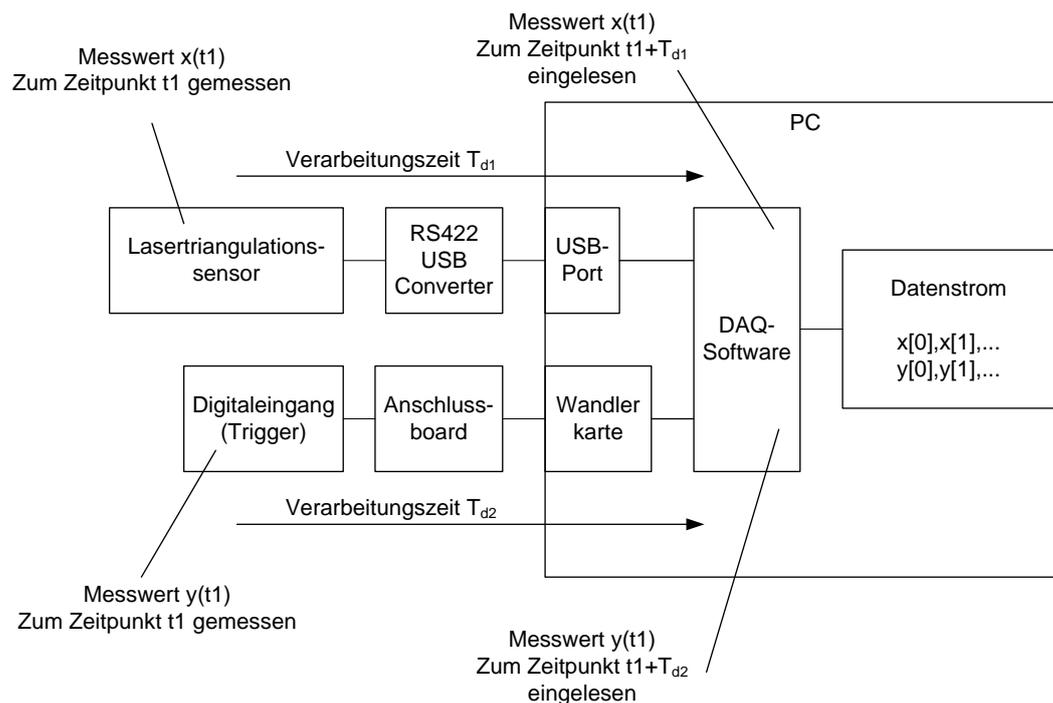


Abbildung 6.19: Latenzzeit zwischen Trigger und Lasertriangulationssensoren, experimentell wurde gezeigt, dass die Verarbeitungszeiten T_{d1} und T_{d2} nicht nur ungleich sind, sondern dass die Differenz der Verarbeitungszeiten $T_{d1}-T_{d2}$ nicht konstant ist

Abbildung 6.19 zeigt ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung des Problems in der Messkette. Da die Verarbeitungszeiten T_{d1} und T_{d2} nicht gleich sind, sind die zusammengehörigen Werte $x(t1)$ und $y(t1)$ im Datenstrom nicht unter demselben Index n zu finden. Würde der Versatz im Datenstrom einer Gesetzmäßigkeit folgen, die für alle Experimente gilt, könnte eine Korrektur durch eine nachträgliche Neuausrichtung der Datenvektoren erfolgen. In einer Versuchsreihe

wurde jedoch gezeigt, dass die eingesetzte Hardware keine konstante Differenz $T_{d1}-T_{d2}$ zulässt. Ein möglicher Grund dafür ist die Verwendung der USB-Schnittstelle für die Lasertriangulationssensoren einerseits und die Verwendung der NIDAQ-Wandlerkarte andererseits. Daher ist es im Laufe der Versuche nötig, über charakteristische Eigenschaften der Signale der Abstandsmessung eine Synchronisierung durchzuführen um die Messwerte der Lasertriangulationssensoren synchron mit anderen Größen darzustellen.

7. Direkte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft

Die Bestimmung der Kontaktkraft kann dazu genutzt werden, Kollisionen zu detektieren und somit den Benutzer und die Systemumgebung zu schützen. Die in Kapitel 4.2 ausgewählten direkten Verfahren zur Bestimmung dieser Kraft werden in diesem Kapitel experimentell auf Ihre Eignung als Auffahrschutz überprüft. Das bedeutet, dass eine Messung der Auflagerkräfte mit Wägezellen und die Motorstrommessung mit der jeweils nötigen Messsignalverarbeitung durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert werden.

7.1 Einsatz der Gewichtsmessung zur Bestimmung von Kontaktkraft und Kontaktposition

Im diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie eine Messung der Tischgewichtskraft verwendet werden kann, um ein Quetschschutzsystem zu implementieren. Eine Kontaktkraft F_P wird in diesem Kapitel als eine zusätzliche Belastung des Systems parallel zur Hochachse aufgefasst. Ziel ist es, diese Kraft unter Einsatz der 4 Auflagerkraftmessungen zu berechnen und zusätzlich deren Einwirkposition zu bestimmen. Die Bestimmung dieses Angriffspunktes der Kontaktkraft ist kein Ziel, welches aus der Aufgabenstellung abgeleitet ist. Da diese Lokalisierung durch die Anordnung der Wägezellen prinzipiell jedoch möglich ist, wird untersucht, ob durch diese Zusatzinformation ein Mehrwert für das Tischsystem generiert werden kann. Das statische Kraftsystem besteht aus der Gewichtskraft G im Schwerpunkt des Tisches und den 4 Auflagerkräften F_{LH} , F_{LV} , F_{RH} und F_{RV} , sowie im Quetschfall einer weiteren Kraft F_P im Berührungspunkt zwischen dem Tisch und dem gequetschten Objekt. Abbildung 7.1 zeigt das stereostatische Kraftsystem, das als Basis der weiteren Ausführungen dient.

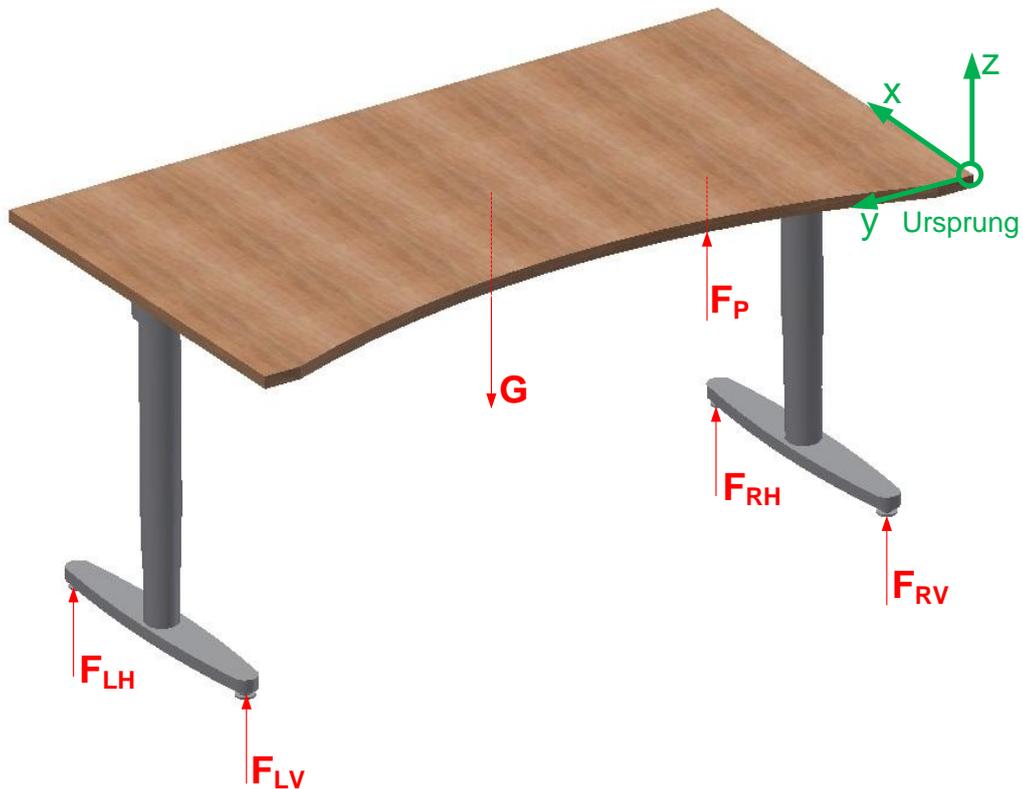


Abbildung 7.1: Stereostatisches Kraftsystem des Tisches; es werden die vier Auflagerkräfte, die Gesamtgewichtskraft des Tisches und die Quetschkraft modelliert; der Ursprung wird für die weiteren Berechnungen in den vorderen, rechten Eckpunkt der Tischplatte gelegt (an der oberen Tischplattenfläche)

In weiterer Folge gehen einige Abmessungen des Tisches in die Berechnung ein, diese werden im Grundriss des Tisches in Abbildung 7.2 dargestellt.

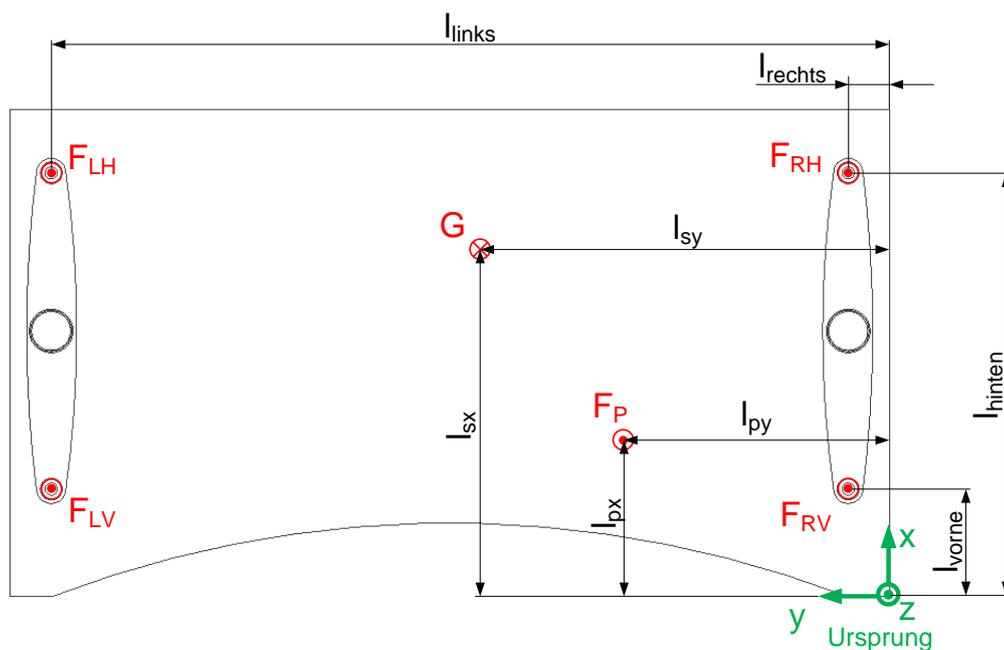


Abbildung 7.2: Tisch im Grundriss mit Kraftabständen bezogen auf den Ursprung; diese Abstände sind in weiterer Folge für die Berechnungen der Momente relevant

Alle Abmessungen beziehen sich auf den gewählten Koordinatenursprung. Die Längen l_{sx} und l_{sy} legen die Schwerpunktlage fest, die aufgrund der Tischgeometrie und der Beladung des Tisches durch Monitore oder Ähnliches im Allgemeinen nicht im Diagonalschnittpunkt der Tischplatte angenommen werden darf. Die Position der Quetschung wird durch die Abmessungen l_{px} und l_{py} festgelegt.

Die Kontaktkraft- und Positionsberechnung erfolgen in einer Sequenz, die durch das Flussdiagramm in Abbildung 7.3 veranschaulicht wird. Die ersten beiden Funktionsblöcke werden ausgeführt solange der Tisch in Ruhe ist, deren Ergebnisse werden für die weiteren Funktionsblöcke benötigt, welche während der Fahrt des Tisches ausgeführt werden. Die einzelnen Phasen werden im folgenden Abschnitt 7.1.1 behandelt.

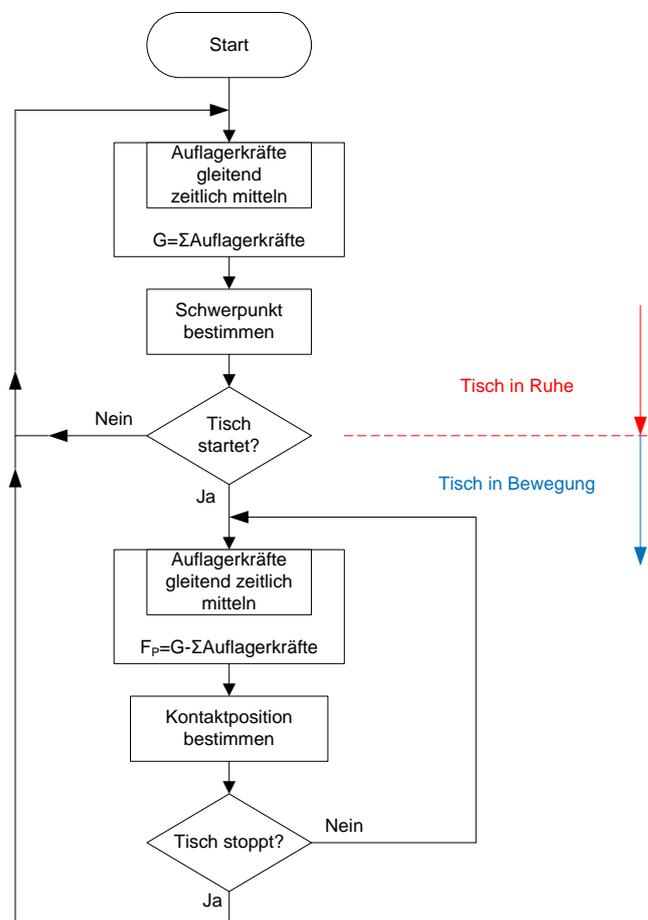


Abbildung 7.3: Ablauf der Kontaktkraft- und Kontaktpositionsberechnung; die Berechnung wird in zwei Phasen unterteilt: in Ruhe wird das Gesamtgewicht des Tisches und die Schwerpunktlage bestimmt, in Bewegung wird die Kontaktkraft und die Kontaktposition berechnet

7.1.1 Physikalische Grundlagen aus der Statik

Aufgrund der Position der Wägezellen wird das Gewicht des gesamten Tisches gemessen, wenn keine Quetschung vorliegt. Die Grundlage für die Bestimmung der Gewichtskraft im Ruhezustand des Tisches ist der Grundsatz der Statik, dass die Summe aller Kräfte Null ist.

$$\Sigma \vec{F} = \vec{0}: \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LH} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LV} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RH} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RV} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -G \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_P \end{pmatrix} = \vec{0} \quad (4)$$

In der Stereostatik entstehen durch das vektorielle Wesen der Kräfte 3 skalare Gleichungen. Da im untersuchten System nur Kräfte in z-Richtung auftreten, bleibt nur eine von Null verschiedene, skalare Gleichung übrig.

$$F_{LH} + F_{LV} + F_{RH} + F_{RV} - G + F_P = 0 \quad (5)$$

Die Bestimmung des Tischgewichts wird ausgeführt, wenn der Tisch in Ruhe steht. Ausgehend davon, dass der Tisch frei steht und daher keine zusätzliche Kraft F_P durch eine Quetschung o.Ä. einwirkt, entspricht die Summe der Auflagerkräfte genau der Gewichtskraft des Tisches mit seiner Zuladung.

$$G = F_{LH} + F_{LV} + F_{RH} + F_{RV} \Big|_{F_P = 0} \quad (6)$$

Um die Messabweichung zu verringern, werden nicht Kräfte zu einem einzigen Zeitpunkt zur Berechnung herangezogen, sondern es wird eine gleitende Mittelwertbildung vorgenommen. Somit ändert sich Gleichung (6) zu

$$\hat{G} = \bar{F}_{LH} + \bar{F}_{LV} + \bar{F}_{RH} + \bar{F}_{RV} \Big|_{F_P = 0} \quad (7)$$

Dabei sind \bar{F}_{LH} , \bar{F}_{LV} , \bar{F}_{RH} und \bar{F}_{RV} die gleitenden Mittelwerte der jeweiligen Auflagerkräfte. Die Schätzung \hat{G} der Gewichtskraft wird für die weiteren Schritte gespeichert, sodass der letztgültige Wert von \hat{G} zu Beginn der Hubbewegung zur Verfügung steht.

Ausgehend vom Kraftsystem des Tisches ohne Quetschung und mit der zuvor berechneten Gewichtskraft kann die Schwerpunktlage des ruhenden Tisches unter Verwendung des Momentensatzes der Statik berechnet werden. Die Summe aller Momente in jedem beliebigen Punkt im Raum muss ebenso wie die zuvor verwendete Kraftsumme Null sein. Die aus der Statik der Ebene bekannte Vorschrift „Moment = Kraft mal Normalabstand“ muss in der Stereostatik in ein Kreuzprodukt aus Kraftvektor im Raum und Abstandsvektor zwischen Kraftwirkungspunkt und untersuchtem Punkt übersetzt werden. Ausgehend von Abbildung 7.2 kann für $F_P = 0$ die Gleichung (8) für die Momentensumme im Ursprung angesetzt werden.

$$\Sigma \vec{M}_{(0)} = \vec{0}:$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LH} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{hinten} \\ l_{links} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LV} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{vorne} \\ l_{links} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RH} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{hinten} \\ l_{rechts} \\ z \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RV} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{vorne} \\ l_{rechts} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -G \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{sx} \\ l_{sy} \\ z \end{pmatrix} = \vec{0} \end{aligned} \quad (8)$$

Durch Auflösen der Kreuzprodukte entsteht das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} -F_{LH}l_{links} \\ F_{LH}l_{hinten} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{LV}l_{links} \\ F_{LV}l_{vorne} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{RH}l_{rechts} \\ F_{RH}l_{hinten} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{RV}l_{rechts} \\ F_{RV}l_{vorne} \\ 0 \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} Gl_{sy} \\ -Gl_{sx} \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0} \end{aligned} \quad (9)$$

Die z-Koordinaten der Abstandsvektoren werden mit der Variable z allgemein gehalten. Da z in jeder Kreuzproduktbestimmung mit Null multipliziert wird, ist es unproblematisch, dass die Höhe unbekannt ist. Weiters zeigt sich, dass nur Momente um die x- und y- Achse auftreten, dieses Ergebnis ist plausibel, da nur Kräfte parallel zur z-Achse auftreten. Somit erhält man 2 skalare Gleichungen die von Null verschieden sind. Diese ermöglichen es, die Schwerpunktpositionen in x- und y-Richtung zu berechnen.

$$l_{sx} = \frac{(F_{LH} + F_{RH})l_{hinten} + (F_{LV} + F_{RV})l_{vorne}}{G} \quad (10)$$

$$l_{sy} = \frac{(F_{LH} + F_{LV})l_{links} + (F_{RH} + F_{RV})l_{rechts}}{G} \quad (11)$$

Die Schwerpunktlage des ruhenden Tisches wird ebenso wie die Gewichtskraft für die weiteren Berechnungen gespeichert.

Sobald die Antriebe des Tisches starten und sich die Tischhöhe ändert, kann eine Quetschung eintreten. Daher wird die Kontaktkraft wieder in das Modell aufgenommen, sie entspricht gemäß Gleichung (5) der Differenz der Gewichtskraft und der Auflagerkräfte.

$$F_P = G - (F_{LH} + F_{LV} + F_{RH} + F_{RV}) \quad (12)$$

Mit dieser Methode ist es möglich, während der Fahrt zu jedem Abtastzeitpunkt der Auflagerkraftmessung die Kontaktkraft zu bestimmen. Da in der Beschleunigungsphase des Tisches neben der Trägheitskraft nach D'Alembert

auch Vibrationen und Stöße auftreten, die sich in den Signalen der Auflagerkraftmessungen abbilden, müssen diese Einflüsse durch eine gleitende Mittelwertbildung unterdrückt werden. Die vergleichsweise hohe Dynamik dieser mechanischen Schwingungen und der Wunsch nach einer möglichst verzögerungsfreien Kollisionserkennung ermöglichen dafür eine Fensterzeit von 50 ms. Dies entspricht einer Fensterlänge von 120 Samples für die gewählte Abtastrate von 2,4 kHz der Wägezellen. Zur Berechnung der Quetschkraft wird die in Gleichung (7) berechnete Schätzung \hat{G} der Gewichtskraft verwendet.

$$\hat{F}_P = \hat{G} - (\bar{F}_{LH} + \bar{F}_{LV} + \bar{F}_{RH} + \bar{F}_{RV}) \quad (13)$$

Die Kontaktkraft liegt somit in jedem Abtastschritt der Auflagerkraftmessung vor und kann direkt dazu verwendet werden, das System zu stoppen, falls diese Kraft einen definierten Schwellwert überschreitet. Die Kontaktkraftberechnung beruht auf der Annahme, dass sich das Gewicht des Tisches während der Fahrt nicht verändert, denn das Tischgewicht steht in diesem Schritt lediglich als im Ruhezustand berechnete Konstante zur Verfügung. Dies stellt eine Einschränkung dar, wenn ein weiteres Be- oder Entladen des Tisches während der Fahrt nicht durchgeführt wird. Dieses Benutzerverhalten ist aber zum einen als untypisch einzustufen, zum anderen kann die Einschränkung toleriert werden, sofern auf das Ändern der Beladung während der Fahrt mit dem Abschalten des Tisches reagiert wird. Es ist jedoch inakzeptabel, dass der Tisch nach der Beladungsänderung weiterfährt und in weiterer Folge nicht auf eine Quetschung reagiert. Die Messwerte der Auflagerkräfte können sich zusätzlich auch durch Drifteffekte zeitlich ändern, beispielsweise wenn die DMS Temperaturschwankungen ausgesetzt werden. Da derartige Drifterscheinungen vergleichsweise langsame Signaländerungen auslösen und der Tisch innerhalb von zirka 20 Sekunden von der obersten in die unterste Position verfahren kann, sind diese Effekte eher unkritisch. Zusätzlich zur oben erläuterten Einschränkung in Bezug auf das Be- und Entladen des Tisches während der Fahrt sei erwähnt, dass nur Kontaktkräfte parallel zur Hochachse modelliert werden. Begründet wird dies durch die Tatsache, dass der Tisch vier einwertige Auflager besitzt, mit denen er auf dem Boden steht. Einwertige Lager nehmen lediglich Kräfte normal zur Kontaktfläche auf, daher können auch nur diese Kräfte mit den Wägezellen gemessen werden. Da die Bewegungsrichtung des höhenverstellbaren Tisches ebenfalls entlang der Hochachse verläuft und somit die überwiegenden Anteile der Kontaktkraft im Allgemeinen in derselben Richtung liegen, stellt die Einschränkung auf Kräfte entlang der z-Achse kein Problem dar.

Während der Fahrt liegt bislang für jeden Abtastschritt der Auflagerkraftmessung eine berechnete Kontaktkraft vor, aus der Ruhephase sind zudem das Gewicht und die Schwerpunktlage des Tisches bekannt. Ausgehend von diesen Größen kann gezeigt werden, wie die Position der Quetschung in jedem Abtastschritt ermittelt werden kann. Zur zuvor erläuterten Einschränkung, dass sich die Beladung des

Tisches nicht verändern darf, muss ergänzend angenommen werden, dass sich die Schwerpunktlage während der Fahrt nicht ändern darf. Der Grund hierfür ist derselbe wie bei der Kontaktkraft selbst. Das gewählte mathematische Modell für die Kräfte im Quetschfall erlaubt es nicht, die Schwerpunktlage in jedem Abtastschritt neu zu berechnen. Die Größen l_{sx} und l_{sy} liegen für diesen Schritt als Konstanten vor, die in der Ruhephase berechnet wurden. Der Momentensatz, der wiederum im Koordinatenursprung angesetzt wird, muss nun um die Kontaktkraft erweitert werden.

$$\Sigma \vec{M}_{(0)} = \vec{0}:$$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LH} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{hinten} \\ l_{links} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{LV} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{vorne} \\ l_{links} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RH} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{hinten} \\ l_{rechts} \\ z \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{RV} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{vorne} \\ l_{rechts} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -G \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{sx} \\ l_{sy} \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_P \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_{px} \\ l_{py} \\ z \end{pmatrix} = \vec{0} \end{aligned} \quad (14)$$

Durch Auflösen der Kreuzprodukte entsteht das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} -F_{LH}l_{links} \\ F_{LH}l_{hinten} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{LV}l_{links} \\ F_{LV}l_{vorne} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{RH}l_{rechts} \\ F_{RH}l_{hinten} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_{RV}l_{rechts} \\ F_{RV}l_{vorne} \\ 0 \end{pmatrix} + \\ & + \begin{pmatrix} Gl_{sy} \\ -Gl_{sx} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_P l_{py} \\ F_P l_{px} \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0} \end{aligned} \quad (15)$$

Wie zuvor können 2 skalare Gleichungen verwendet werden, um die Kontaktposition l_{px} und l_{py} zu bestimmen.

$$l_{px} = \frac{Gl_{sx} - (F_{LH} + F_{RH})l_{hinten} - (F_{LV} + F_{RV})l_{vorne}}{F_P} \quad (16)$$

$$l_{py} = \frac{Gl_{sy} - (F_{LH} + F_{LV})l_{links} - (F_{RH} + F_{RV})l_{rechts}}{F_P} \quad (17)$$

Aus den beiden Formeln für die Kontaktposition in x- und y-Richtung geht hervor, dass eine Berechnung nur für Kontaktkräfte ungleich Null sinnvoll ist. Daher wird man die Ausführung dieser Berechnung bei der Integration in das System an die Bedingung $F_P \neq 0$ knüpfen.

Mit dem nun vollständigen Gleichungssatz, der die Messwerte der vier Auflagerkräfte in eine Kontaktkraft und Kontaktposition übersetzt, kann gezeigt werden, dass eine Änderung der Beladung des Tisches während der Fahrt bewirkt, dass das System stoppt.

Ausgehend von einer Tischmasse m_T liefert Gleichung (6) für den Tisch in Ruhe

$$G = F_{LH} + F_{LV} + F_{RH} + F_{RV} = m_T g \quad (18)$$

Da G für die weiteren Berechnungen gespeichert wird, kann während der Fahrt keine Korrektur dieser Variable vorgenommen werden. Wird die Tischmasse während der Fahrt trotzdem um Δm geändert, ändern sich die Messwerte der Auflagerkräfte, und Gleichung (12) liefert eine von Null verschiedene Kontaktkraft damit die Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist.

$$F_P = G - F_{LH} + F_{LV} + F_{RH} + F_{RV} = \Delta m g \quad (19)$$

Ein Schwellwertdetektor, der ein Stoppen des Tisches bewirken soll, wird somit auf eine Änderung der Tischbelastung reagieren, sofern der Schwellwert kleiner als die Beladungsänderung gewählt wird.

7.1.2 Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems

Die Leistungsfähigkeit des Systems wird für eine ausgewählte Anzahl von Experimenten untersucht. Im ersten Schritt werden Versuche durchgeführt, in denen sich der Tisch in Ruhe befindet. Dabei werden in einer Messreihe verschiedene Gewichte an verschiedenen Punkten auf der Tischplatte als Simulation einer Kontaktkraft aufgelegt. Die Resultate zeigen, dass dieses Messsystem Massen in der Größenordnung 1kg erkennen und lokalisieren kann, wenn sich der Tisch in Ruhe befindet.

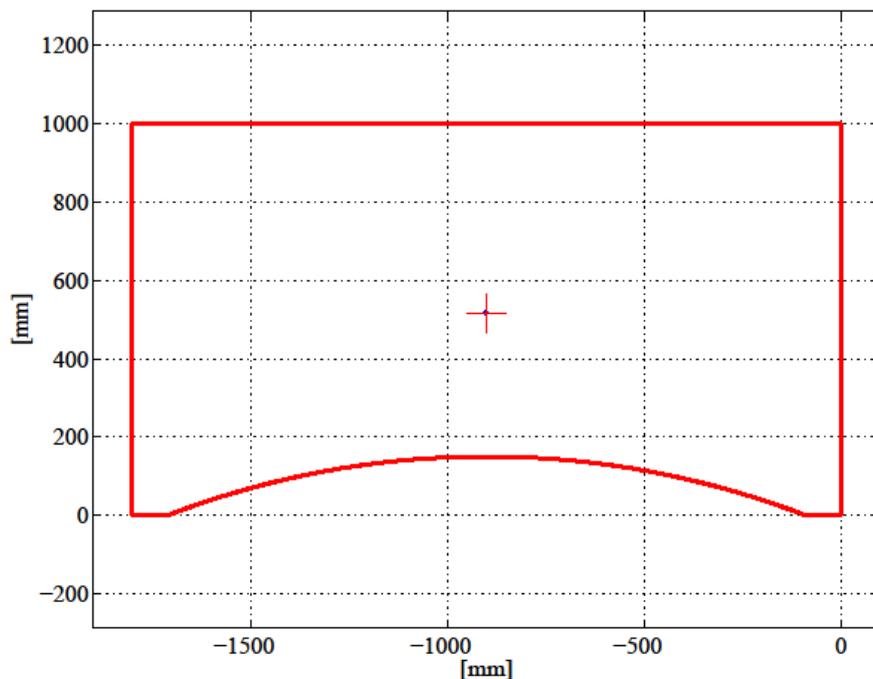


Abbildung 7.4: Lokalisierung des Kontaktpunktes in der Tischebene (Tisch im Grundriss); das rote Kreuz markiert die Stelle, an der eine Masse von 1 kg auf die Tischplatte aufgelegt wird; der blaue Punkt entspricht einer sehr dichten Punktwolke, die durch die Lokalisierung des Gewichtes auf der Tischplatte für jeden Abtastzeitpunkt über einen Zeitraum von 5 Sekunden berechnet wird

Abbildung 7.4 zeigt für jeden Abtastzeitpunkt innerhalb von 5 Sekunden, an dem die Position einer 1 kg schweren Masse geschätzt wird, einen Punkt auf der Oberfläche der Tischplatte. Dieser zeitliche Verlauf der Lokalisierung des Angriffspunktes der Kontaktkraft zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Punkt, auf den das Gewicht aufgelegt wurde. Die Ausdehnung der Punktwolke beträgt weniger als 5mm sowohl in x- als auch in y-Richtung, damit liegt die Messunsicherheit in derselben Größenordnung wie die Bestimmung des tatsächlichen Angriffspunktes, da diese mit einem Rollmaß und einem Winkeleisen durchgeführt wird. Die Berechnung der Gewichtskraft jener Masse, die sich auf dem Tisch befindet, erfolgt mit der Schätzung für die Kontaktkraft aus Formel (13). Die 1 kg schwere Masse wird dazu auf dem Tisch positioniert und die Gewichtsschätzung für 5 Sekunden zu jedem Abtastzeitpunkt der Wägezellen durchgeführt. Über die gesamte Messzeit ergibt die Mittelung aller Schätzwerte eine Gewichtskraft von 9,991 N, was einer akzeptablen Abweichung von 0,181 N zur tatsächlichen Gewichtskraft entspricht.

In einer zweiten Serie von Experimenten werden reale Quetschungen während der Bewegung des Tisches durchgeführt. Dazu wird ein Schaumstoffprüfling zwischen einem stillstehenden Objekt und dem nach unten fahrenden Tisch (Tischplatte) eingequetscht und die Fahrt erst zu einem Zeitpunkt beendet, an dem ein Tischbein den Bodenkontakt verliert. Um zu analysieren, wie die Leistungsfähigkeit des Modells von der Kollisionsposition, der Zuladung des Tisches und den mechanischen Eigenschaften des Prüflings abhängen, werden diese Einflüsse in der Experimentreihe variiert. Tabelle 7.1 zeigt die Konfiguration der durchgeführten Experimente in Bezug auf die Variation der Parameter, wobei alle Versuche bei Abwärtsfahrt durchgeführt werden. Dabei kommen zwei verschiedene Härtegrade der Schaumstoffprüflinge zum Einsatz.

Bezeichnung	l_{px} [mm]	l_{py} [mm]	Zuladung [kg]	Schaumstoffprüfling (Härte)
A	115	282	Keine	Hart
B	115	282	Keine	Weich
C	115	282	25	Hart
D	115	282	25	Weich
E	115	282	50	Weich
F	213	955	Keine	Hart
G	213	955	25	Weich
H	213	955	50	Weich
I	545	365	Keine	Hart
J	545	365	25	Weich
K	545	870	Keine	Hart
L	545	870	25	Weich
M	790	910	Keine	Hart
N	790	910	25	Weich
O	790	910	50	Weich
P	805	343	Keine	Hart
Q	805	343	Keine	Weich
R	805	343	25	Hart
S	805	343	252	Weich
T	805	343	50	Weich

Tabelle 7.1: Experimente zur Validierung der Kontaktkraftberechnung basierend auf der Auflagerkraftmessung; Abstandsangaben beziehen sich auf das bemaßte Koordinatensystem in Abbildung 7.2; die Zuladungen wurden über dem Diagonalschnittpunkt der Tischplatte aufgelegt; alle Experimente werden bei Abwärtsfahrt durchgeführt; mit diesen Experimenten wird in weiterer Folge die Receiver Operating Characteristic berechnet

Der Verlauf der Kontaktkraft für Experiment A lt. Tabelle 7.1 kann Abbildung 7.5 entnommen werden. Es zeigt sich, dass beim Anfahren, trotz gleitender Mittelwertbildungen in den Berechnungsschritten, Kontaktkräfte ungleich Null berechnet werden. Dies wird durch die Wahl der Fensterlänge bei den gleitenden Mittelwertbildungen der Auflagerkräfte hervorgerufen und kann Auswirkungen auf die Detektor-Performance haben. Größere Fensterzeiten beheben dieses Problem, verzögern die Signale jedoch beträchtlich, wodurch die Detektion in hohem Maße zum realen Ereignis verzögert wird. Die ROC-Kurve in Abbildung 7.8 zeigt jedoch, dass die Signale beim Anfahren kein Problem darstellen.

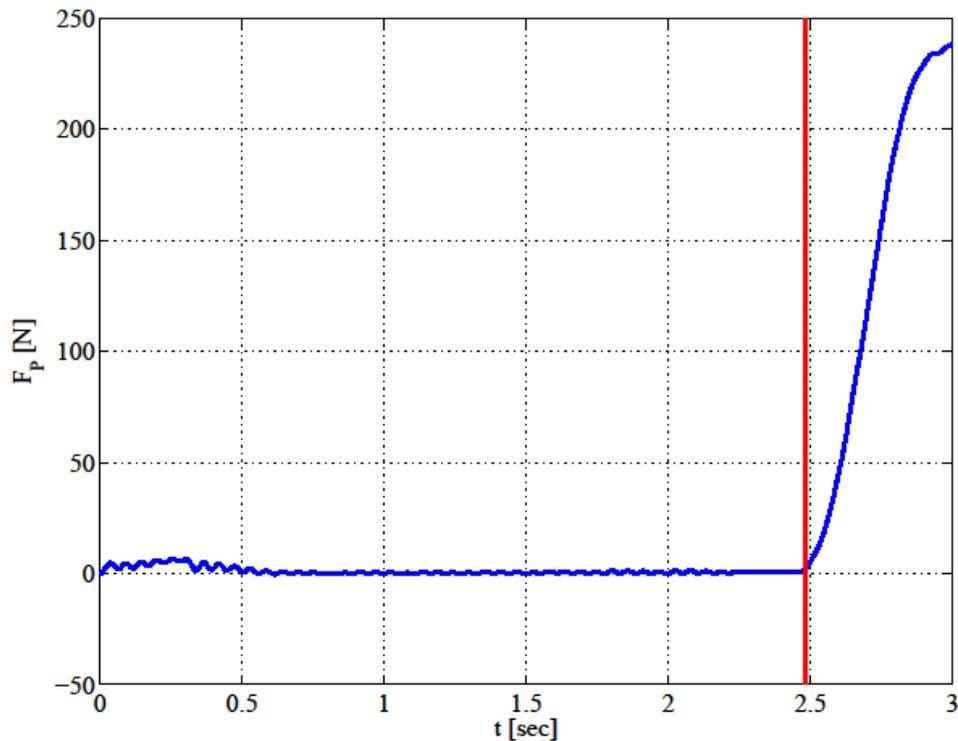


Abbildung 7.5: Verlauf der Kontaktkraft ab dem Beginn der Abwärtsfahrt für Experiment A lt. Tabelle 7.1, ermittelt mit Hilfe der Auflagerkräfte; der Kollisionszeitpunkt mit dem stillstehenden Schaumstoffprüfling wird durch die rote, vertikale Linie angedeutet

Wird das System zur Lokalisierung der Kontaktposition eingesetzt, ergibt sich für Experiment A lt. Tabelle 7.1 der in Abbildung 7.6 gezeigte zeitliche Verlauf der Lokalisierung des Angriffspunktes der Kontaktkraft. Um den gezeigten zeitlichen Verlauf der Lokalisierung des Kontaktpunktes zu erhalten, werden die Formeln (16) und (17) mit der ansteigenden Kontaktkraft zwischen 20 und 200 N (vgl. Abbildung 7.5) ausgeführt. Die Abweichung zum tatsächlichen Kontaktpunkt kann auf die dynamischen Vorgänge während Fahrt und Quetschung zurückgeführt werden, denn der Momentensatz, der dem Schätzer zugrunde liegt, wird ohne Berücksichtigung dynamischer Vorgänge wie Stöße oder Vibrationen aufgestellt. Außerdem wird der Tisch als starres System modelliert, und Verformungen wie zum Beispiel das Kippen der Tischplatte um den metallischen Querträger fließen nicht in die Berechnung ein.

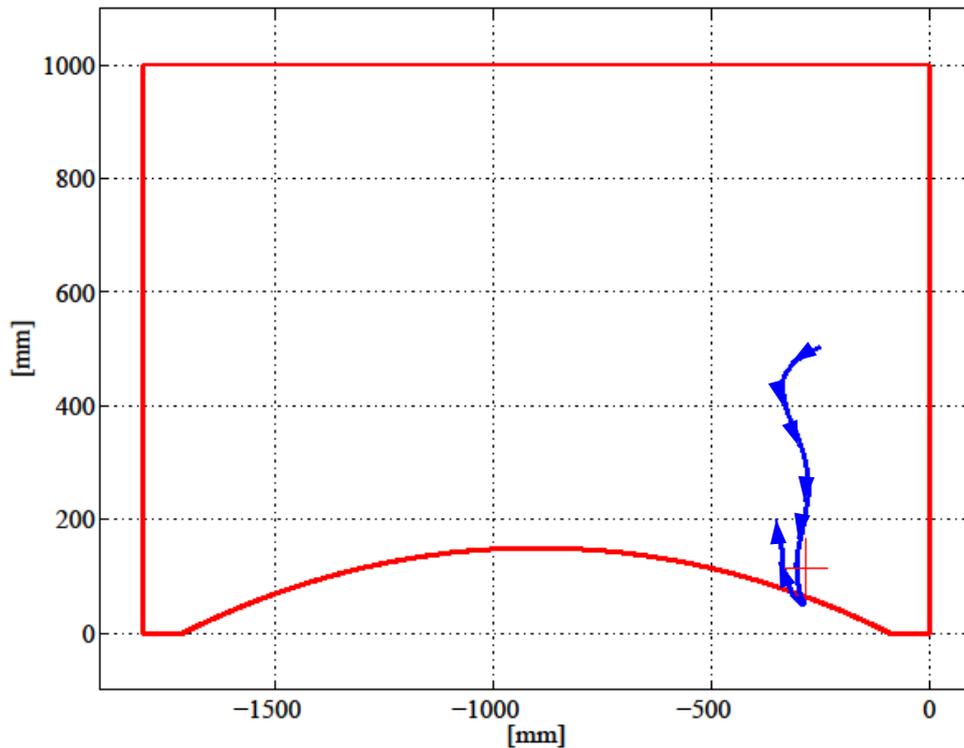


Abbildung 7.6: Lokalisierung des Kontaktpunktes in der Tischebene (Tisch im Grundriss) für Experiment A lt. Tabelle 7.1; mit den Pfeilen wird der zeitliche Verlauf der Lokalisierung indiziert, wobei sich die Kontaktkraft über die Zeit von 20 N auf 200 N steigert

Basierend auf der in Kapitel 7.1.1 erarbeiteten Formelsammlung zur Schätzung der Kontaktkraft F_P lässt sich ein binärer Detektor zur Kollisionserkennung implementieren, dessen Signalfluss in Abbildung 7.7 gezeigt wird.

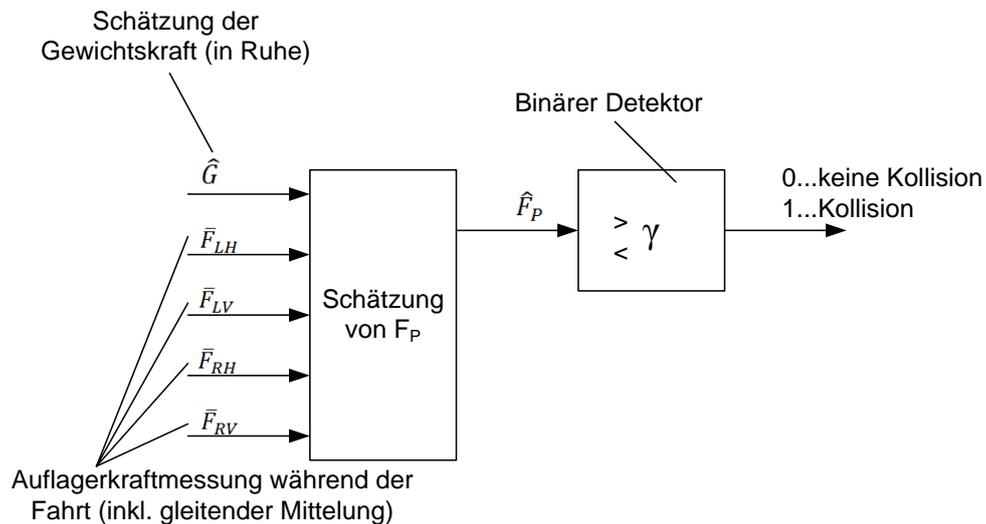


Abbildung 7.7: Binärer Detektor zur Kollisionserkennung; wird ein definierter Schwellwert γ für die Kontaktkraft überschritten, wird eine Kollision angenommen; die Schätzung der Kontaktkraft F_P beruht auf der Auflagerkraftmessung; die Wahl des Schwellwertes wird unter Zuhilfenahme der Receiver Operating Characteristic durchgeführt

Mit Hilfe der in Abbildung 7.8 gezeigten Kurve, der Receiver-Operating-Characteristic (ROC), kann die Performance des Schwellwertdetektors evaluiert werden. Ein optimaler Detektor weist einerseits eine möglichst geringe Wahrscheinlichkeit falsch positiver Detektionen während der Fahrt bei gleichzeitig möglichst großer Wahrscheinlichkeit der Detektion von Quetschungen auf. Aus Abbildung 7.5 geht hervor, dass sich innerhalb von 150 ms eine Kontaktkraft von 50 N aufbaut, daher wird die maximale Reaktionszeit auf eine Kollision für den binären Detektor mit 100ms spezifiziert. Die ROC-Kurve wird für die in Tabelle 7.1 aufgelisteten Experimente ermittelt.

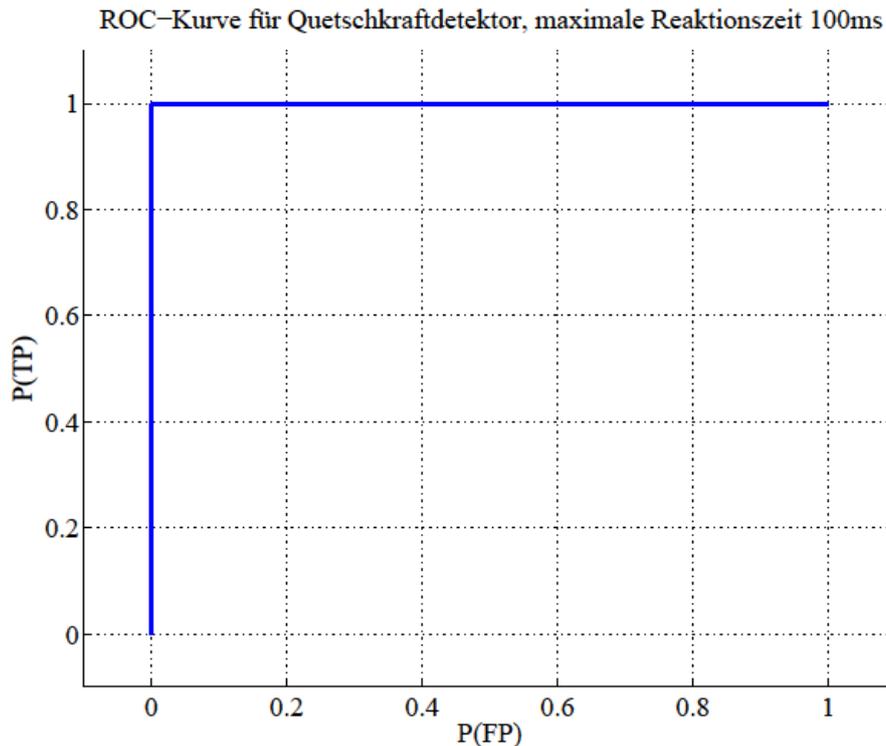


Abbildung 7.8: ROC-Kurve für den Kontaktkraftdetektor auf Basis der Gewichtsmessung für eine maximale Reaktionszeit von 100 ms; der Punkt der optimalen Detektor-Performance ($P(TP) = 1$ und $P(FP) = 0$) kann mit Schwellwerten zwischen 22 – 31 N erreicht werden (siehe Abbildung 7.9)

Die ROC-Kurve in Abbildung 7.8 deutet auf ein sehr gutes Verhalten des Detektors hin. Das bedeutet, es kann ein Schwellwert gewählt werden, sodass für die durchgeführten Experimente mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% innerhalb von 100 ms eine Quetschung detektiert werden kann. Für den gleichen Schwellwert gilt, dass es keine falsch positiven Detektionen während der Fahrt gibt. Die ROC-Kurve entsteht durch Variation des Schwellwerts, dieser ist in dem Diagramm jedoch nicht ersichtlich. Um die Wahl des optimalen Schwellwerts zu ermöglichen, wird der Abstand jedes Punktes der ROC-Kurve vom optimalen Betriebspunkt mit den Koordinaten (0/1) berechnet und in Abbildung 7.9 dargestellt.

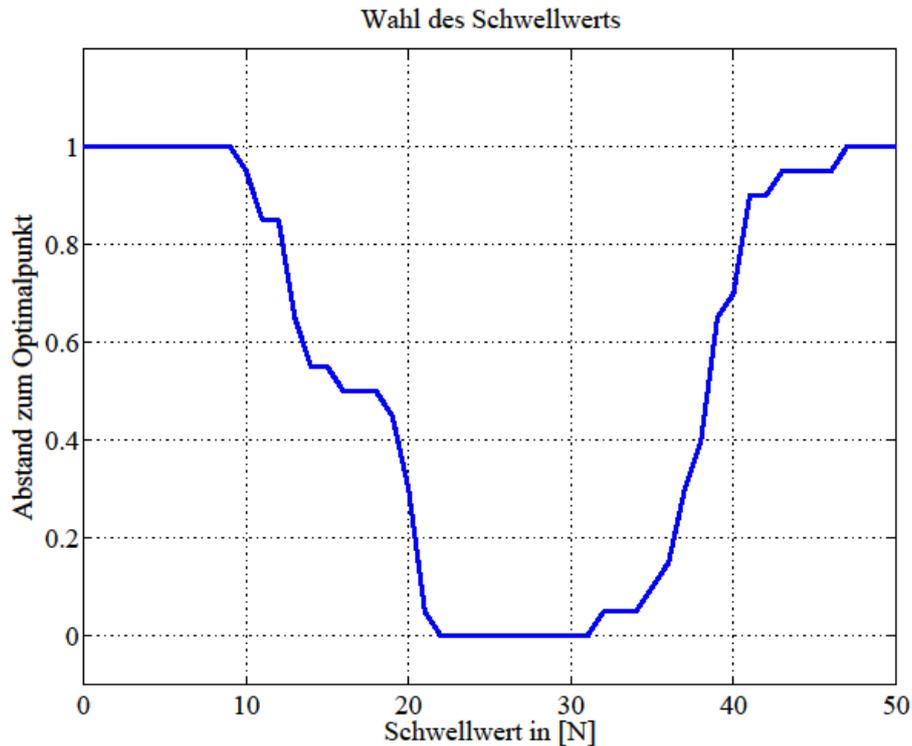


Abbildung 7.9: Wahl des Schwellwerts anhand des Abstands zum optimalen Betriebspunkt der Receiver-Operator-Characteristics des Detektors

Für Schwellwerte zwischen $22N$ und $31 N$ ist der Abstand zum Optimum gleich Null, das heißt der Detektor befindet sich für diesen Wertebereich im optimalen Betriebspunkt. Der Grund dafür, dass höhere Schwellwerte keine optimale Detektion ermöglichen, beruht auf der Tatsache, dass ein Ansprechen innerhalb von 100 ms vorgegeben wurde. Da die Kontaktkraft in diesem Zeitraum keine höheren Werte annimmt kann die Quetschung nicht mehr mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% detektiert werden.

7.1.3 Diskussion

Der große Vorteil der gezeigten Kontaktkraftermittlung ist die Tatsache, dass die Kontaktkraft direkt ermittelt werden kann um den Tisch zu stoppen. Der in der Domäne Kraft implementierte Detektor, hat den Vorteil, dass sich der Wunsch des Auftraggebers nach einer als Kraft spezifizierten Abschaltswelle für das System umsetzen lässt. Ein Überschreiten eines parametrierbaren Kontaktkraft-Schwellwertes erzwingt in weiterer Folge das Stehenbleiben des Tisches. Die ROC-Kurve zeigt, dass die Wahl eines Schwellwerts im Bereich $22\text{-}31\text{ N}$ ein Ansprechverhalten innerhalb von 100 ms ermöglicht, wobei 100% der Kollisionen erkannt werden und keine falsch positiven Detektionen vorkommen. Zu beachten ist dabei jedoch, dass die diskutierte ROC lediglich für die Menge der durchgeführten Experimente gültig ist. Es ist aber absehbar, dass die Performance dieses Verfahrens auch für eine größere Menge von Experimenten bzw. im Feldeinsatz sehr gut ist.

Als größten Nachteil muss man die konstruktiven Schwierigkeiten bei der Integration der Wägetechnik in den mechanischen Aufbau des Tisches beachten. Für die optimale Performance der Kontaktkraftschätzung ist es nötig, die Wägeeinrichtungen in Bodennähe zu platzieren, beispielsweise an jedem der vier Auflagerpunkte zum Boden. Nur dadurch ist gewährleistet, dass das Gewicht des ganzen Tisches gemessen wird, wodurch Kollisionen mit jedem Element des Tisches erkannt werden können. Statt der vier Wägezellen an den Auflagern ist eine Integration von je einem dieser Messsysteme in die Verbindung zwischen Tischbein und Ausleger denkbar. Auf die Bestimmung der Kontaktkraft hat dies keine negativen Auswirkungen, die Lokalisierung des Angriffspunktes der Kontaktkraft verliert dadurch jedoch die Tiefeninformation in x-Richtung des gewählten Koordinatensystems. Die beiden genannten Messpositionen werden in Abbildung 7.10 gezeigt.

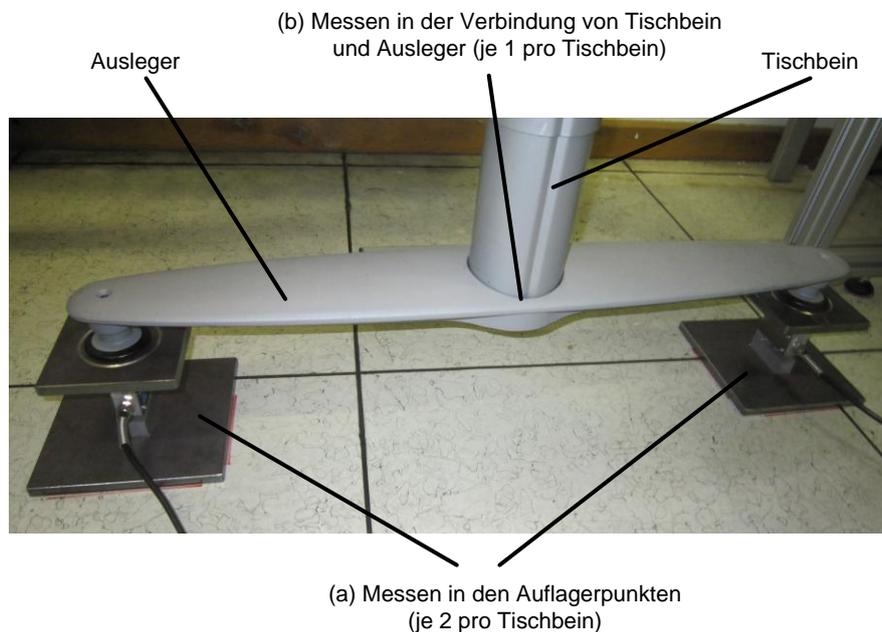


Abbildung 7.10: Mögliche Positionen zur Auflagerkraftmessung in Bodennähe; dadurch wird sichergestellt, dass das Gewicht des gesamten Tisches gemessen wird und daher auch Kollisionen mit jedem Element des Tisches erkannt werden können; die Variante (a) hat den Vorteil, dass mit vier Wägezellen die Lokalisierung des Angriffspunktes einer Kontaktkraft in der gesamten horizontalen Ebene des Koordinatensystems ermöglicht wird; bei Variante (b) geht die Tiefeninformation der Lokalisierung in x-Richtung verloren, für die Schätzung der Kontaktkraft selbst hat die Reduktion der Anzahl der Sensoren jedoch keine negativen Auswirkungen

Aus Designgründen muss die Verkabelung im Falle der Gewichtsmessung in Bodennähe versteckt in den Tischbeinen vorgenommen werden, dies bedingt den Einsatz von Spiralkabeln in diesen teleskopartigen Linearantriebseinheiten. Diese Kabel sind jedoch teuer und durch die mechanische Zugbeanspruchung anfällig auf Kabelbruch, zudem müssen konstruktive Änderungen an den Tischbeinen vorgenommen werden um ausreichend Platz für die Kabel zu schaffen, und um sie an den Elektromotoren und der Spindel vorbeiführen zu können.

Alternativ zum Einsatz von vier Wägezellen am Boden ist es denkbar, zwei oder vier Wägezellen zwischen den Tischbeinen und der Tischplatte anzubringen, wodurch nur die Tischplatte gewogen wird. Dadurch können die Probleme der Kabelverlegung reduziert werden. Beim Einsatz von je einem Sensor direkt in den Montageeinrichtungen der Tischbeine geht jedoch ebenso wie bei der in Abbildung 7.10 gezeigten Variante (b) die Tiefeninformation der Lokalisierung des Kontaktpunktes verloren und die Abstände können nur noch in y-Richtung des gewählten Koordinatensystems berechnet werden. Um dies zu verhindern, können vier Wägezellen in den Punkten platziert werden, an denen die Tischplatte mit dem Unterbau verschraubt ist. Bei einer Messung in der Verbindung zwischen Tischbeinen und Tischplatte gilt jedoch, dass nur das Gewicht der Tischplatte gemessen wird und eine Quetschung mit dem metallischen Unterbau somit nicht direkt detektiert werden kann.

Die Lokalisierung des Kontaktpunktes ist eine Ergänzung des Systems und geht über die in der Aufgabenstellung definierten Anforderungen hinaus. Während der Fahrt kann diese Positionsberechnung ohne Berücksichtigung dynamischer Vorgänge und mechanischer Eigenschaften wie der Verformbarkeit des Tisches nicht durchgeführt werden. Es ist jedoch möglich, die Position, an denen Kräfte im Stillstand des Tisches eingebracht werden, sehr genau zu bestimmen. Eine Möglichkeit dies zu nutzen wird im Ausblick in Kapitel 9.3 gezeigt.

7.2 Einsatz der Motorstrommessung der Antriebe zur Detektion von Laständerungen

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie die aktuell in der Motorsteuerung aufgebaute Motorstrommessung verwendet werden kann, um kollisionsbedingte Laständerungen zu detektieren.

7.2.1 Grundlagen

Die in Abbildung 7.11 gezeigte Motorstrommessung ist in die Motorsteuerung integriert. Der Spannungsabfall an einem $50\text{m}\Omega$ -Shunt ist dem Motorstrom proportional und wird nach entsprechender Filterung und Signalkonditionierung an den A/D-Umsetzer des Mikrocontrollers angelegt. Somit kann das laufende Programm im Controller einen Strommesswert in Ampere berechnen und verarbeiten.

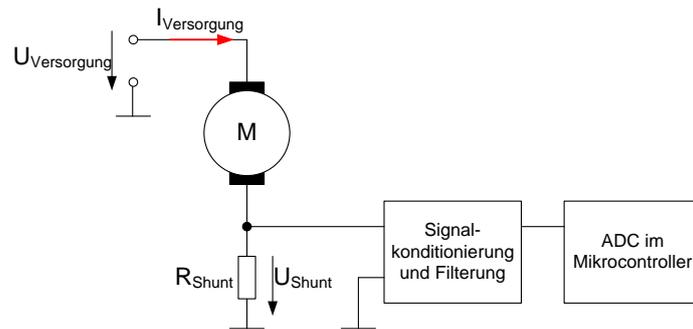


Abbildung 7.11: Motorstrommessung in der Steuerung; in die Motorstromversorgung ist ein 50 mΩ Shunt integriert, der Spannungsabfall ist proportional zum Motorstrom und wird über einen Block zur Signalkonditionierung und Filterung an einen AD-Umsetzer des Mikrocontrollers angelegt

In jedem der beiden teleskopartig aufgebauten Tischbeine ist ein permanenterregter DC-Motor mit einem Spindeltrieb verbaut. Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen dient der lineare Zusammenhang zwischen dem Ankerstrom und dem Ankerdrehmoment für diese Motoren. In einer Versuchsreihe muss belegt werden, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen Motorstrom und Gewichtsbelastung des Tischbeins herrscht. Falls eine Vorschrift in der Form

$$F_{Bein} = k_{I2F} \cdot I_{Bein} + d_{I2F} \quad (20)$$

nachgewiesen werden kann, müssen die Parameter k_{I2F} und d_{I2F} geschätzt werden. Damit können die weiteren Überlegungen in der Domäne Kraft und nicht in der Domäne Strom angestellt werden. Das lineare Modell gilt aufgrund des hohen Einschaltstroms nicht während dem Einschalten der Motoren und auch nicht bei Abschaltvorgängen, daher kann es nur im stationären Betrieb der Motoren gültige Werte liefern. Aufgrund der variablen Beladung des Tisches wird vorgeschlagen, lediglich auf Änderungen der berechneten Zuladung während der Fahrt zu reagieren. Daher wird das Signal während der Konstantfahrt mittelwertbefreit, sodass es im Normalzustand Null und im Falle einer Laständerung, beispielsweise bedingt durch eine Kollision, ungleich Null ist.

7.2.2 Kalibrierung der Umrechnung von Motorstrom auf Gewichtskraft

Bei der Kalibrierung werden die Parameter k_{I2F} und d_{I2F} aus Formel (20) aus einer Versuchsreihe geschätzt. Dazu werden während einer langen, ununterbrochenen Konstantfahrt und ohne Kollision die Kräfte in den Säulen synchron zu den Motorströmen gemessen. Das ergibt für jeden Versuch und für jedes Tischbein ein zusammengehöriges Punktepaar von Motorstrom und Gewichtsbelastung des Tischbeins.

Die Belastung eines Tischbeins entspricht der Summe der beiden linken bzw. rechten Auflagerkräfte. Ausgehend von Abbildung 7.1 ergeben sich somit

$$F_{\text{Bein,links}} = F_{LV} + F_{LH} \quad (21)$$

und

$$F_{\text{Bein,rechts}} = F_{RV} + F_{RH} \quad (22)$$

Somit kann die bereits in Kapitel 7.1 verwendete Auflagerkraftmessung mit den Wägezellen erneut eingesetzt werden um die Kräfte im linken und rechten Tischbein zu messen. Als Beispiel für den Zusammenhang zwischen Motorstrom und Belastung des Tischbeins werden in Abbildung 7.12 die gemessenen Punktpaare und die Ausgleichsgerade für das rechte Tischbein bei der Abwärtsfahrt gezeigt. Um die Ausgleichsgerade zu erhalten, werden die Steigung und der Offset der Geraden aus den gemessenen Punktpaaren nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Da die Punkte sehr nahe an der Ausgleichsgeraden liegen kann die lineare Modellannahme verwendet werden, um aus den Motorströmen die Gewichtsbelastungen der Tischbeine zu berechnen. Abbildung 7.12 zeigt auch kalibrationsbedingte Ausreißer im Bereich höherer Lasten.

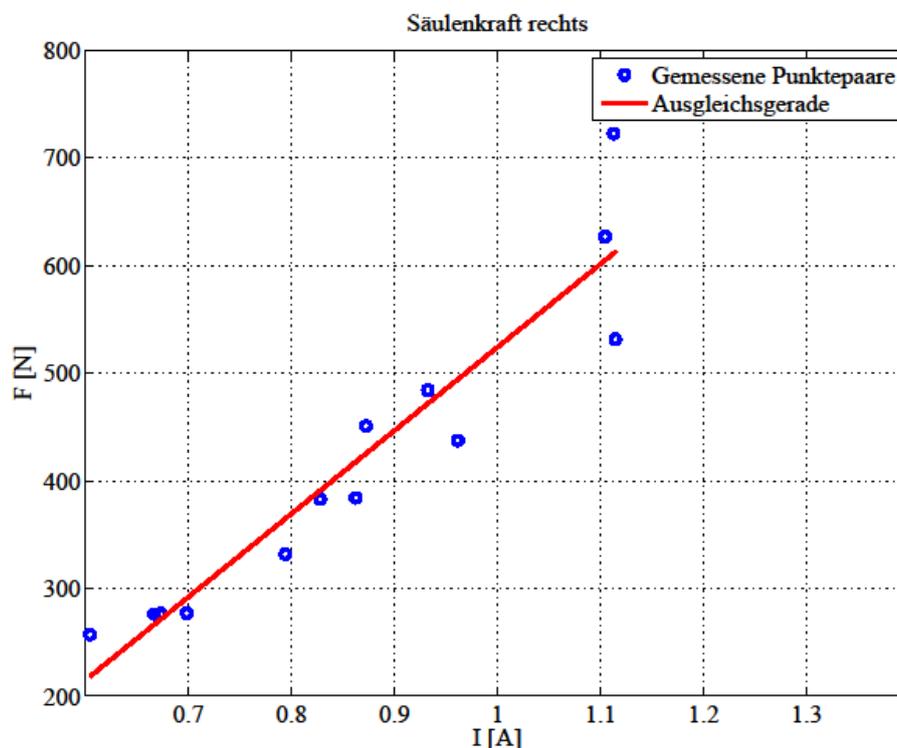


Abbildung 7.12: Ausgleichsgerade zur Kalibrierung des Zusammenhangs zwischen Motorstrom und Belastung des Tischbeins rechts

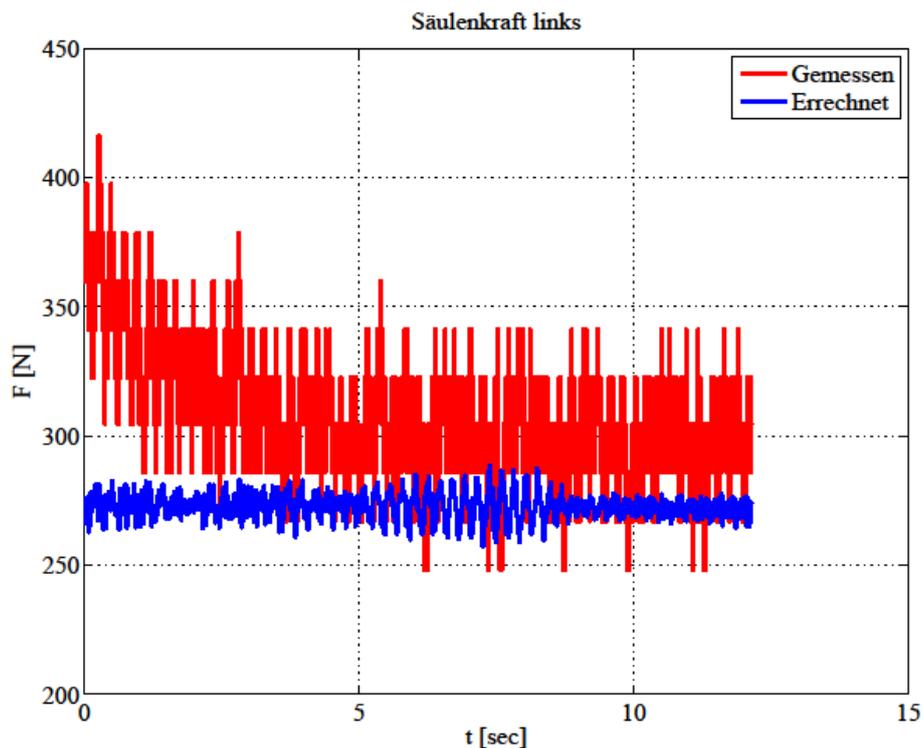


Abbildung 7.13: Gewichtsbelastung des linken Tischbeins während der Abwärtsfahrt; die Änderung der errechneten Gewichtsbelastung kann auf den Eingriff einer mechanischen Bremse zurückgeführt werden, die in die Lineareinheiten integriert ist

In Abbildung 7.13 wird gezeigt, welche Werte das lineare Modell bei Abwärtsfahrt für das linke Tischbein liefert. Auffällig ist, dass die berechnete Gewichtsbelastung über die Zeit abnimmt. Begründet wird dies durch den Eingriff einer mechanischen Bremse bei der Abwärtsfahrt, die sich auf die Regelung der Antriebe und damit auf den Motorstrom auswirkt. Der Einsatz solcher Brems-einrichtungen wird mit der beschränkten Selbsthemmung des Antriebssystems begründet, mechanische Bremsen ermöglichen höhere Beladungen für die Bürotische. Die Änderung des Stroms während der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ist in der linken Antriebseinheit des Tisches deutlicher ausgeprägt als rechts. Ohne weitere Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die beiden Tischbeine eine unterschiedliche Anzahl an Betriebsstunden aufweisen, und dass aufgrund der unterschiedlichen Reibungseigenschaften der Linearantriebe der Bremseneingriff mehr oder weniger stark ausgeprägt ist.

Da die Motorstrommessung eine Auflösung von ca. 20 mA hat, wird diese Quantisierung ebenfalls mit dem Parameter k_{I2F} multipliziert. Der Steigungsparameter liegt bei der Abwärtsfahrt in der Größenordnung von 700-800 N/A, daher ergibt sich in der Domäne Kraft eine Quantisierung von 14-16 N. Um das Quantisierungsrauschen zu unterdrücken, wird eine Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von 7 Hz nach der Umrechnung des Motorstroms in eine Kraft durchgeführt. Die Grenzfrequenz wird durch den Wunsch nach Glättung des Quantisierungsrauschens einerseits und durch die Notwendigkeit der Erhaltung

der Signaldynamik bei der Kollision andererseits bestimmt. Einen geglätteten Signalverlauf zeigt Abbildung 7.14.

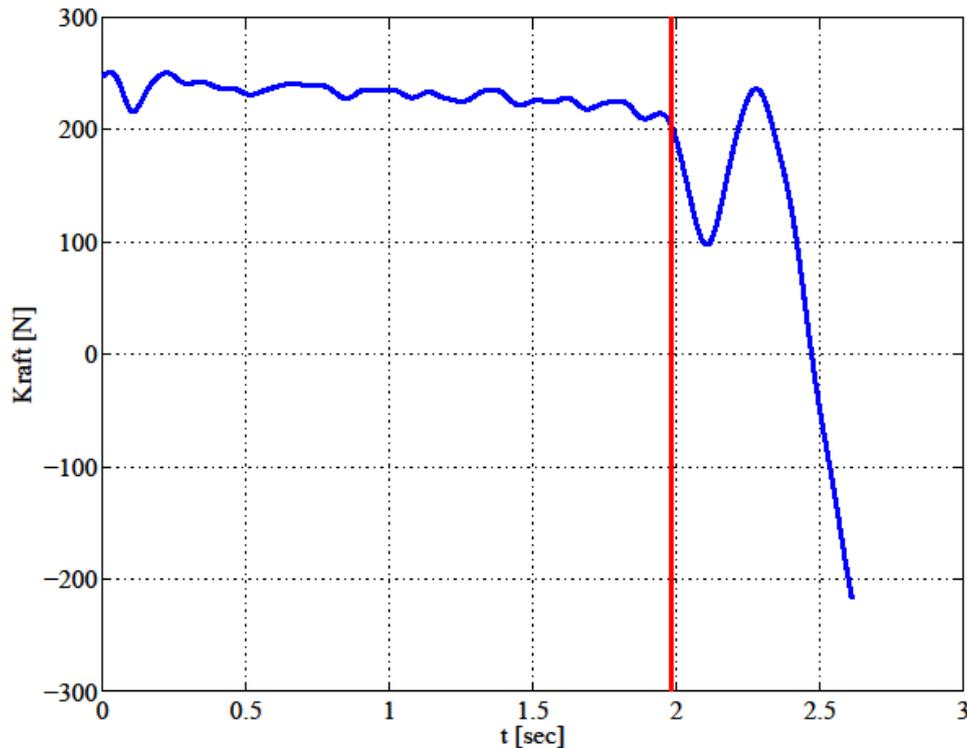


Abbildung 7.14: Gewichtsbelastung des rechten Tischbeins während der Abwärtsfahrt (aus dem Motorstrom berechnet), die rote Linie zeigt den Kollisionszeitpunkt mit einem harten Objekt an

Die Gewichtsbelastung ändert sich deutlich im Falle einer Quetschung. Eine Kollision bei der Abwärtsfahrt entlastet zumindest ein Tischbein deutlich, der berechnete Kraftwert fällt ab dem Zeitpunkt der Kollision, der in Abbildung 7.14 durch die rote Vertikale angedeutet ist. Die Kraft steigt jedoch kurz nach der Quetschung wieder an, dies kann mit dem Anstieg des Stroms bei Verlust des Bodenkontakts beider Auflager des rechten Tischbeins begründet werden. Die Stromaufnahme erhöht sich in diesem Fall, da nun das Eigengewicht der Lineareinheit beim Einfahren gehoben werden muss. Aufgrund der variablen Tischlast ist es nicht möglich, für Signale mit dem zuvor gezeigten Verlauf einen einzigen Schwellwert für alle Lastfälle zu setzen.

7.2.3 Mittelwertbefreiung des Kraftverlaufs

Um einen Detektor zu betreiben, der auf Änderungen der Gewichtsbelastung des jeweiligen Tischbeins reagiert, muss das in Abbildung 7.14 gezeigte Signal mittelwertbefreit werden. Dadurch ist es möglich, unabhängig von der Beladung des Tisches einen Schwellwert zu setzen, der einer Schranke für zulässige bzw. unzulässige Laständerungen entspricht. Dazu wird ein IIR-Tiefpassfilter eingesetzt, dessen Ausgangssignal der Änderung durch die mechanische Bremse folgt, der Signaländerung bei der Quetschung jedoch nicht. Daher ist die Grenzfrequenz des Butterworth-Filters 2. Ordnung sehr niedrig zu wählen, in diesem Fall bei 0,15 Hz. Der Signalflussgraph in Abbildung 7.15 zeigt, dass von

der zuvor berechneten Kraft das Ausgangssignal des Filters abgezogen wird um das mittelwertbefreite Signal zu erhalten. Da der entworfene IIR-Filter eine Gruppenlaufzeit von ca. 1,65 Sekunden aufweist und die Abtastrate 500 Hz beträgt, muss das Kraftsignal mit einem Verzögerungsglied um 825 Samples verschoben werden. Das mittelwertbefreite Signal ist in Abbildung 7.16 ersichtlich.

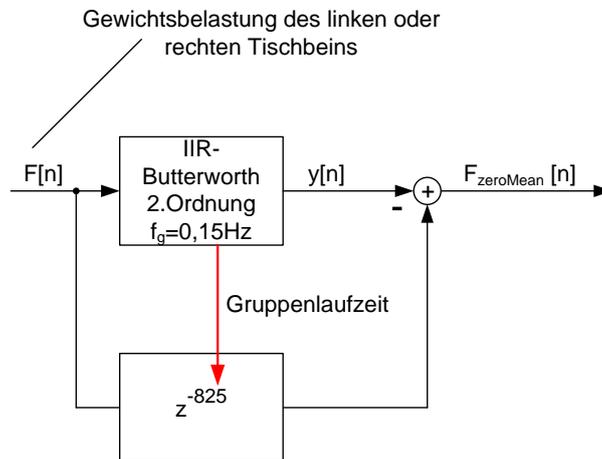


Abbildung 7.15: Signalfluss der Mittelwertbefreiung; mit dem Verzögerungsglied im unteren Zweig wird die Gruppenlaufzeitkompensation vorgenommen

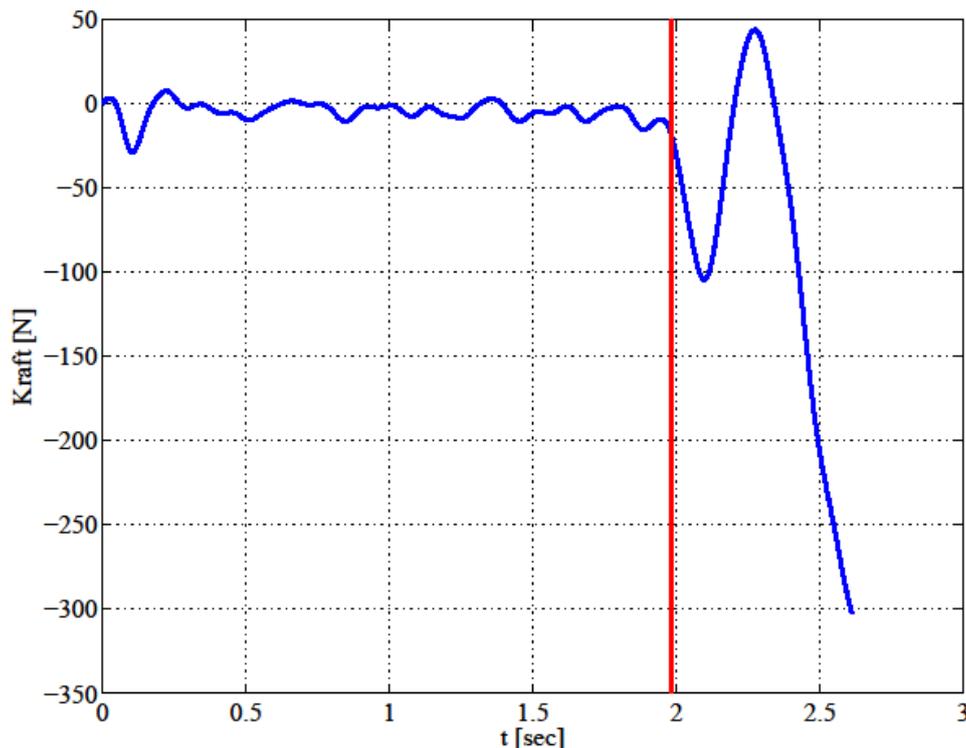


Abbildung 7.16: Mittelwertbefreites Kraftsignal des rechten Tischbeins während der Abwärtsfahrt, die rote Linie zeigt den Kollisionszeitpunkt mit einem harten Objekt an

Wenn dieses System zur Kollisionsdetektion in die Motorsteuerung integriert werden soll, kann die Mittelwertbefreiung nicht mit dem IIR-Filter vorgenommen werden. Die zur Gruppenlaufzeitkompensation benötigte Verzögerung des

Gewichtssignals macht eine Detektion nutzlos wenn man bedenkt, wie viel schneller sich hohe Kontaktkräfte bei einer Kollision aufbauen. Daher wird vorgeschlagen, folgende IIR-Struktur zu verwenden, da die Gruppenlaufzeit mit 0,3 Sekunden wesentlich geringer ist:

$$F_{zeroMean}[n] = \alpha \cdot F[n] + (1 - \alpha) \cdot F_{zeroMean}[n - 1] \quad (23)$$

Der IIR-Filter besitzt eine Nullstelle im Ursprung und einen Pol auf der reellen Achse bei $(1-\alpha)$. Die Wahl des Parameters α erfolgt versuchsweise, die besten Ergebnisse liefert der Wert 0,005. Der Frequenzgang in Abbildung 7.17 zeigt ein Tiefpassverhalten mit einer Grenzfrequenz von 0,38 Hz.

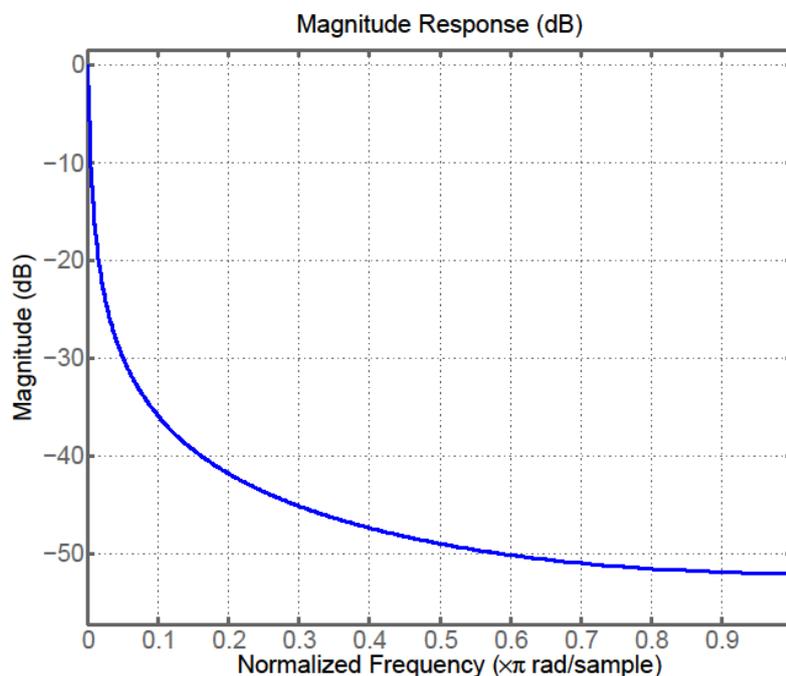


Abbildung 7.17: Frequenzgang der gewählten IIR-Filterstruktur, die Grenzfrequenz des Tiefpasses beträgt 0,38 Hz, die Gruppenlaufzeit beträgt im Durchlassbereich ca. 0,3 Sekunden

7.2.4 Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems

Zur Detektion einer Kollision wird für die Motorstrommessung jedes Tischbeins der Signalfluss gemäß Abbildung 7.18 modelliert.

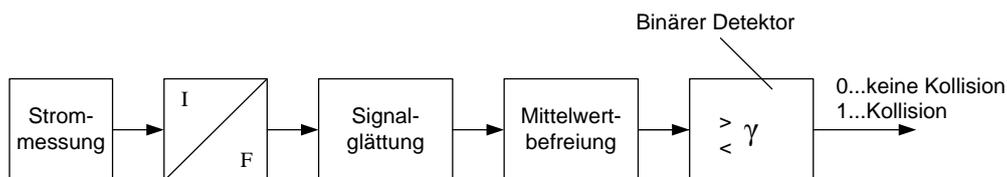


Abbildung 7.18: Signalfluss zur Detektion einer Kollision basierend auf der Motorstrommessung für jedes Tischbein; die Strommesswerte werden in die Kräfte in den Tischbeinen umgerechnet, diese Kraftsignale werden geglättet und mittelwertbefreit; ein binärer Detektor entscheidet entsprechend einer eingestellten Schwelle in der Domäne Kraft ob eine Kollision vorliegt oder nicht

Die Stromsignale aus beiden Tischbeinen werden unabhängig voneinander gemäß Abbildung 7.18 in Kräfte umgerechnet. Nach Glättung und Mittelwertbefreiung dieser Signale entscheidet ein binärer Detektor entsprechend einer eingestellten Schwelle, ob eine Kollision vorliegt oder nicht. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Schwellwertdetektors, der die mittelwertbefreiten Kraftsignale als Eingang besitzt, wird mit einer ROC-Kurve vorgenommen. Diese wird für die Abwärtsfahrt und beide Tischbeine separat aufgenommen, dazu werden Experimente entsprechend der in Tabelle 7.2 gezeigten Konfigurationen durchgeführt.

Bezeichnung	I_{px} [mm]	I_{py} [mm]	Zuladung [kg]	Schaumstoffprüfling (Härte)
A	115	282	Keine	Hart
B	115	282	Keine	Weich
C	115	282	25	Hart
D	115	282	25	Weich
E	115	282	50	Hart
F	115	282	50	Weich
G	213	955	Keine	Hart
H	213	955	Keine	Weich
I	213	955	25	Hart
J	213	955	25	Weich
K	213	955	50	Hart
L	213	955	50	Weich
M	790	910	Keine	Hart
N	790	910	Keine	Weich
O	790	910	25	Hart
P	790	910	25	Weich
Q	790	910	50	Hart
R	790	910	50	Weich
S	820	1240	Keine	Hart
T	820	1240	Keine	Weich
U	820	1240	25	Hart
V	820	1240	25	Weich
W	820	1240	50	Hart
X	820	1240	50	Weich

Tabelle 7.2: Experimente zur Validierung der Laständerungserkennung basierend auf der Motorstrommessung; Abstandsangaben beziehen sich auf das bemaßte Koordinatensystem in Abbildung 7.2; die Zuladungen wurden über dem Diagonalschnittpunkt der Tischplatte aufgelegt; alle Experimente werden bei Abwärtsfahrt durchgeführt; mit diesen Experimenten wird in weiterer Folge die Receiver Operating Characteristic berechnet

Die in Abbildung 7.19 und Abbildung 7.20 gezeigten ROC-Kurven lassen den Schluss zu, dass die Detektion einer Kollision im Vergleich zur in Kapitel 7.1 vorgestellten Variante weniger zuverlässig ist und auch eine längere Ansprechzeit benötigt. Für das rechte Tischbein kann 0,75 Sekunden nach der Kollision bei einer Schaltschwelle von -60 N das bestmögliche Ergebnis erzielt werden.

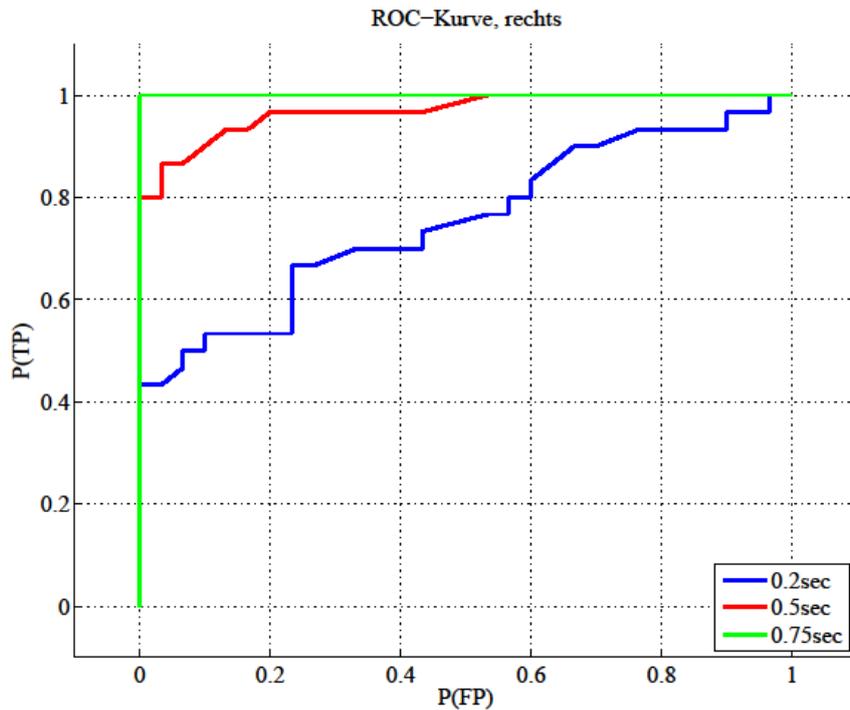


Abbildung 7.19: ROC-Kurve für die Detektion von Laständerungen im rechten Tischbein, je nach maximal zulässiger Ansprechzeit ab der Kollision ergibt sich eine unterschiedliche Qualität der Detektion

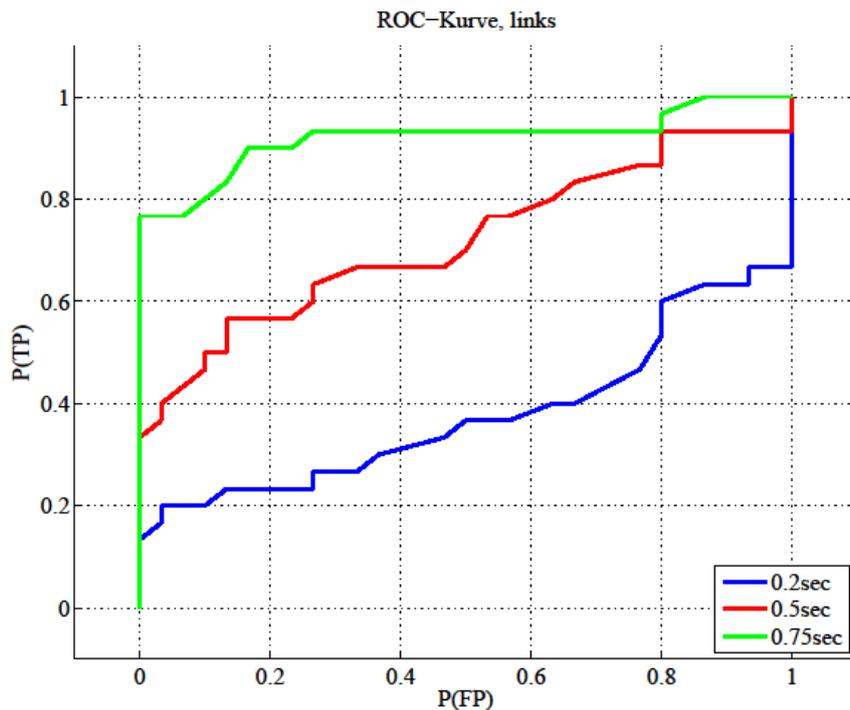


Abbildung 7.20: ROC-Kurve für die Detektion von Laständerungen im linken Tischbein, je nach maximal zulässiger Ansprechzeit ab der Kollision ergibt sich eine unterschiedliche Qualität der Detektion

Die Performance-Unterschiede zwischen linkem und rechtem Tischbein werden wiederum auf die unterschiedliche Reibung bedingt durch die unterschiedliche Anzahl der Betriebsstunden zurückgeführt, daher ist in einer späteren Untersuchung im Unternehmen mit einer Serie von Dauertests zu klären, wie

langzeitstabil das vorgeschlagene System ist. Die relativ hohe Wahrscheinlichkeit von falsch positiven Detektionen während der Fahrt wird auf Schwingungen in den Stromsignalen zurückgeführt, die bei der Abwärtsfahrt durch das Eingreifen der mechanischen Bremse und des Reglers hervorgerufen werden. Es ist daher möglich mit einer besseren Regelung der Antriebe die Receiver-Operating-Characteristic des Detektors deutlich zu verbessern. Die ROC-Kurve in Abbildung 7.21 zeigt, dass der vorgeschlagene IIR-Filter gemäß Formel (23) zur Mittelwertbefreiung mit geringen Performanceeinbußen für den Detektor verbunden ist, da der Butterworth-Filter die bereits diskutierte, lange Gruppenlaufzeit besitzt, muss dies jedoch bei der Implementierung in Kauf genommen werden.

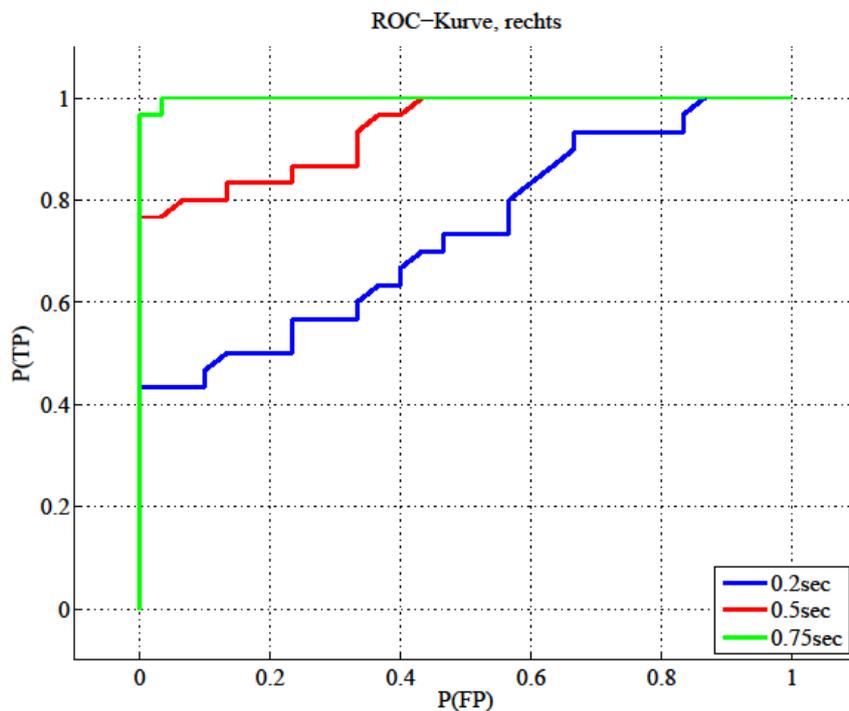


Abbildung 7.21: ROC-Kurve für die Detektion von Laständerungen im rechten Tischbein; zur Mittelwertbefreiung wird der IIR-Filter aus Gleichung (23) eingesetzt

In den Experimenten werden die Eigenschaften einer Schwellwertdetektion bei der Abwärtsfahrt des Tisches untersucht, das Ergebnis bei der Aufwärtsfahrt ist deutlich besser, weil die Linearantriebe auf Druck belastet werden. Bei der Abwärtsfahrt wird zuerst die Spindelmutter entlastet, erst dann macht sich eine Stromänderung bemerkbar. Bei der Aufwärtsfahrt drückt der Spindeltrieb die Mutter nach oben und eine Kollision erhöht den Strom sofort ohne einen Wechsel der belasteten Gewindeflanke. Der deutliche Signalanstieg wird in Abbildung 7.22 gezeigt.

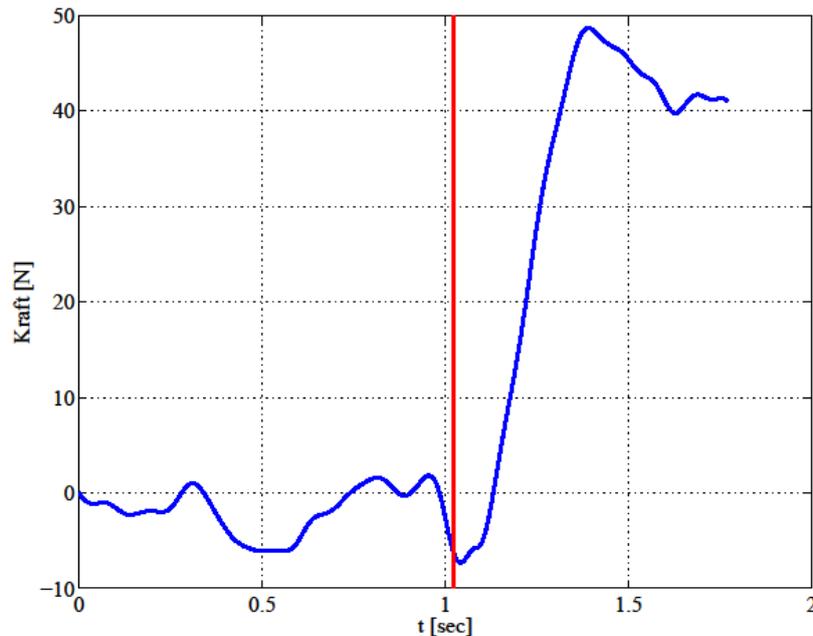


Abbildung 7.22: Mittelwertbefreites Signal der Gewichtsbelastung des rechten Tischbeins; die rote Linie zeigt den Zeitpunkt einer Kollision bei der Aufwärtsfahrt an

7.2.5 Diskussion

Ein grundlegendes Problem der Motorstrommessung und der linearen Modellannahme zur Berechnung der Gewichtsbelastung der beiden Tischbeine liegt im Anfahren und Verzögern der Motoren. In diesen Bereichen liefert das Modell keine zulässigen Werte für die Gewichte, daher kann der Tisch für die Zeiträume des Anfahrens und Verzögerns der Antriebe mit der vorgestellten Methode nicht geschützt werden. Die Interpretation der ROC-Kurven lässt auch eine Kombination von je zwei parallel betriebenen Detektoren pro Tischbein mit unterschiedlichen Schwellen zu. Eine Schwellwertoperation wird so eingestellt, dass eine Detektion mit kurzer Ansprechzeit möglich ist, dabei wird in Kauf genommen, dass ein geringer Prozentsatz an falsch positiven Detektionen auftreten kann. Mit einem unempfindlicheren Detektor kann dafür gesorgt werden, dass das System für die durchgeführten Experimente mit 100% Wahrscheinlichkeit, aber mit längerer Ansprechzeit gestoppt wird. Das ermöglicht zwar keinen Personenschutz, kann aber als Schutz der mechanischen Komponenten bzw. als Kippschutz für die Tischplatte eingesetzt werden. Die Kalibrierung des Zusammenhangs zwischen Motorstrom und Gewichtsbelastung muss für die unterschiedlichen Tische und Antriebe, die mit Steuerungen des Auftraggebers ausgestattet werden, möglichst automatisch erfolgen. Ein möglicher Ansatz ist die Integration der Kalibrierung in den Funktionstest des Tisches bei der Endmontage. Dabei müssen zum Beispiel drei bekannte, unterschiedliche Massen auf den Tisch aufgelegt werden, um verschiedene Lastfälle zu simulieren. Bei mehreren Fahrten mit dem Hubmechanismus, sowohl in Abwärts- als auch in Aufwärtsrichtung, werden die Modellparameter aus dem gemessenen Motorstrom und den bekannten Gewichten berechnet und in der Steuerung gespeichert.

8. Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft

Wirkt eine Kraft auf die Tischplatte ein, kippt diese um die x- und/oder y-Achse des in Abbildung 7.1 vorgestellten Koordinatensystems. Somit ist es möglich, diese Lageänderungen als Auswirkung einer Kollision zu messen und die Motoren im Quetschfall zu stoppen. Im folgenden Abschnitt werden die indirekten Verfahren zur Bestimmung einer Kontaktkraft erläutert, die das Verkappen der Tischplatte als Ausgangspunkt der Überlegungen gemeinsam haben.

8.1 Einsatz der Lasertriangulationssensoren zur Messung der Verkippung der Tischplatte

Wie bereits in Kapitel 5.2.4 vorgeschlagen wird, ist die Rekonstruktion einer der Tischplatte entsprechenden Ebene, aufbauend auf drei Abstandsmessungen mit Lasertriangulationssensoren, als Referenz für weitere indirekte Verfahren durchzuführen. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie diese Referenzmessung aufgebaut wird und welche Ergebnisse sie liefert.

8.1.1 Grundlagen

Ist die Position von drei Punkten A, B und C der Tischplatte (vgl. Abbildung 8.1) bekannt, kann eine Gleichung für die Ebene ε angegeben werden, die durch diese Punkte aufgespannt wird. Um die Lage dieser Ebene im Raum zu verdeutlichen, ist es zweckmäßig deren Normalvektor zu ermitteln. Dazu muss von zwei Vektoren, die je ein Punktpaar in der Ebene miteinander verbinden, lediglich das Kreuzprodukt ermittelt werden. Die Ortsvektoren der drei Punkte A, B und C lauten:

$$\vec{OA} = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}, \vec{OB} = \begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix}, \vec{OC} = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} \quad (24)$$

Da die Lasertriangulationssensoren unter dem Tisch montiert sind, liegen die drei vermessenen Punkte auf der unteren, horizontalen Fläche der Tischplatte. Wenn der Aufbau gemäß Abbildung 8.1 vorgenommen wird, womit sichergestellt ist, dass die drei vermessenen Punkte nicht auf einer Geraden liegen, können zwei Vektoren zur Verbindung der drei Punkte berechnet werden:

$$\vec{AB} = \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ z_B - z_A \end{pmatrix}, \quad \vec{BC} = \begin{pmatrix} x_C - x_B \\ y_C - y_B \\ z_C - z_B \end{pmatrix} \quad (25)$$

Die beiden Vektoren \vec{AB} und \vec{BC} liegen ebenfalls in der Ebene ε . Um den Normalvektor der Ebene ε zu berechnen, die durch die beiden Vektoren aus Formel (25) aufgespannt wird, ist ein Kreuzprodukt nötig.

$$\vec{n}_\varepsilon = \vec{AB} \times \vec{BC} \quad (26)$$

Um die Lage nun so einfach wie möglich darzustellen, ist es für die weiteren Ausführungen ausreichend, den Winkel zwischen der positiven z-Achse und dem Normalvektor der Ebene zu ermitteln.

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{n}_\varepsilon \cdot \vec{e}_z}{|\vec{n}_\varepsilon| \cdot |\vec{e}_z|} \quad (27)$$

In Formel (27) wird der Einheitsvektor in Richtung der positiven z-Achse verwendet:

$$\vec{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

In dieser Berechnung geht zwar die Richtungsinformation der Verkipfung verloren, diese wird für einen einfachen Detektor jedoch nicht benötigt.

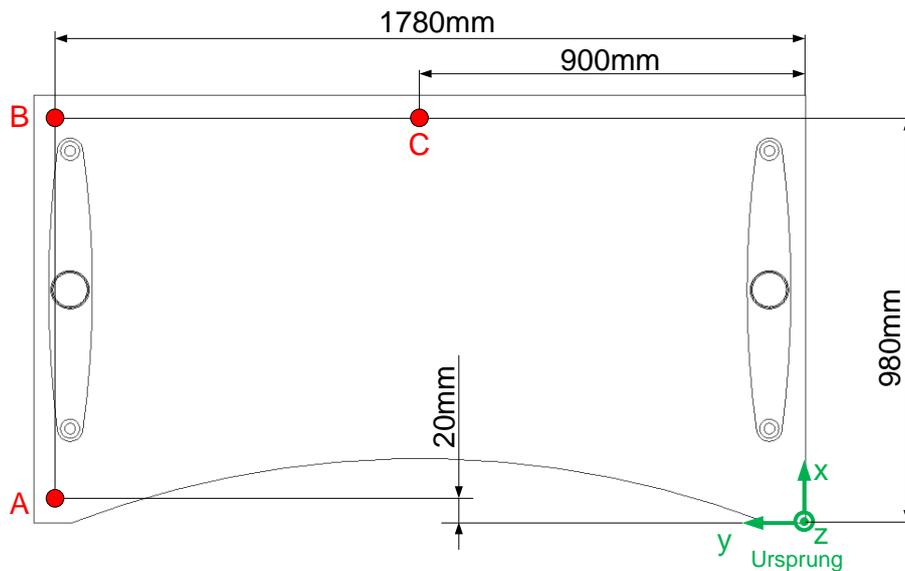


Abbildung 8.1: Die roten Punkte stellen die 3 vermessenen Punkte im Grundriss des Tisches dar, die Punkte sind jeweils 20mm vom Rand der Tischplatte entfernt; da die Lasertriangulationssensoren unter dem Tisch montiert sind, wird die untere, horizontale Fläche der Tischplatte vermessen

Abbildung 8.1 zeigt die Positionen der vermessenen Punkte in x- und y-Richtung und es wird angenommen, dass sich diese – zumindest in der frühen Phase einer Quetschung – durch die Verkipfung in x- und y-Richtung nicht ändern. Damit können die Abstände in der x-y-Ebene laut Abbildung 8.1 als x- und y-Koordinaten für die drei Punkte A, B und C verwendet werden. In z-Richtung ändert sich die Position der Punkte entsprechend der Fahrgeschwindigkeit. Um die Lage in z-Richtung während der Fahrt zu ermitteln, wird zuerst jeder Punkt mit einem Lasertriangulationssensor vermessen. Somit liegt für jeden

Abtastschritt das Punkt-Tripel A, B und C vor, dass mit den Formeln (24) bis (28) zur Berechnung jenes Winkels verwendet wird, den der Normalvektor der Tischplattenebene und die positive z-Achse einschließen. Die in Kapitel 6.4 erläuterte Montage der drei Sensoren bedingt, dass die Sensoren im Sub-Millimeterbereich nicht exakt in derselben Höhe am Gestell platziert werden können. Daher müssen zu Beginn der Messung eventuell auftretende Höhendifferenzen der Sensoren zueinander ausgeglichen werden. Dazu wird der in Abbildung 8.2 angedeutete Offsetabgleich am ruhenden Tisch durchgeführt. Die Abstandsinformation von Sensor 1 wird als Bezugshöhe definiert, die jeweilige Differenz zwischen den gemessenen Abstandswerten von Sensor 1 und Sensor 2, sowie von Sensor 1 und Sensor 3 werden als Offsets gespeichert. Während der Fahrt werden diese gespeicherten Werte vorzeichenrichtig von den Signalen der der Sensoren 2 und 3 subtrahiert, womit alle drei Messungen auf die durch Sensor 1 definierte Bezugshöhe korrigiert werden.

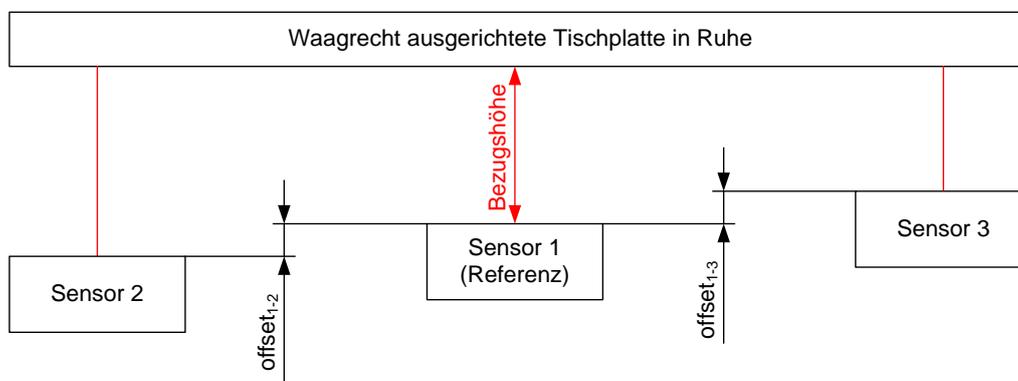


Abbildung 8.2: Der Offsetabgleich der Lasertriangulationssensoren wird am ruhenden, mit der Wasserwaage eingerichteten Tisch vorgenommen. Der gemessene Abstand eines Sensors übernimmt die Rolle der Bezugshöhe (Sensor 1), die Offsets zu den beiden weiteren Sensoren werden in Bezug auf Sensor 1 ermittelt und gespeichert; sobald der Tisch losfährt werden die gespeicherten Offsets der Sensoren 2 und 3 zu jedem Zeitpunkt durch vorzeichenrichtige Subtraktion korrigiert

8.1.2 Ausgewählte Experimente zur Validierung des Systems

Bevor eine Kollision des bewegten Tisches mit einem Objekt experimentell durchgeführt und vermessen wird, soll eine statische Überprüfung die Funktion des Systems sicherstellen. Dazu wird die Tischplatte zuerst mit der Wasserwaage horizontal ausgerichtet und, wie in Abbildung 8.3 (a) angedeutet wird, mit den Lasertriangulationssensoren vermessen. Das Messergebnis wird mit dem beschriebenen Offsetabgleich auf 0° korrigiert. Anschließend wird der Tisch, wie in Abbildung 8.3 (b) gezeigt wird, an einer Seite angehoben und mit der bekannten Geometrie kann der entstandene Kippwinkel rechnerisch ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass nicht an einer Stelle die Höhe der Tischplatte gemessen wird, sondern an zwei gegenüberliegenden Randstellen. Damit ergeben sich die Höhen h_1 und h_2 für die horizontale Tischplatte und h_3 und h_4 für die verkippte Tischplatte. Diese Vorgangsweise wird durch den Boden auf dem der Tisch steht begründet, da dieser im Allgemeinen nicht exakt waagrecht ist.

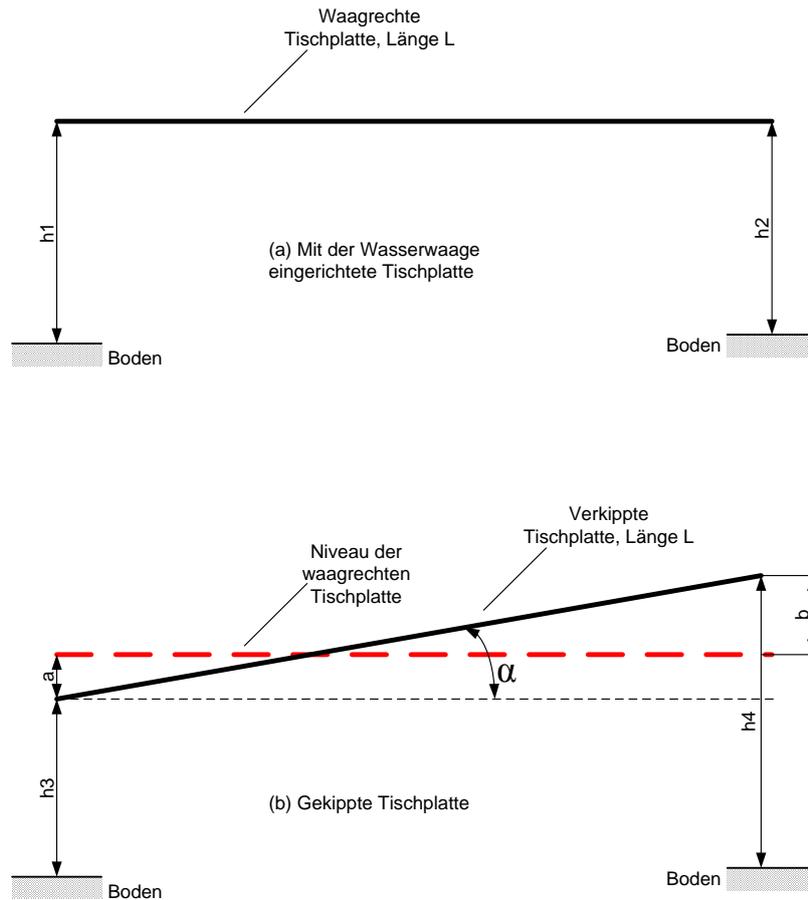


Abbildung 8.3: Statische Validierung der Kippwinkelberechnung: Der Tisch wird waagrecht ausgerichtet (a) und die beiden Höhen h1 und h2 werden ermittelt; danach wird der Tisch gekippt (b) und die Höhen h3 und h4 ebenfalls mit einem Rollmaß gemessen; damit kann der Kippwinkel berechnet und mit dem Ergebnis der Messung mit den Lasertriangulationssensoren und der anschließenden Winkelberechnung verglichen werden

Mit folgenden Formeln wird für die gemessenen Längen h1, h2, h3 und h4 der Kippwinkel ermittelt:

$$a = h1 - h3 \quad (29)$$

$$b = h4 - h2 \quad (30)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{a + b}{L} \quad (31)$$

Für $L = 1800 \text{ mm}$, $h1 = 855 \text{ mm}$, $h2 = 857 \text{ mm}$, $h3 = 850 \text{ mm}$ und $h4 = 932 \text{ mm}$ ergibt sich ein Kippwinkel $\alpha = 2,55^\circ$. Dieses Ergebnis muss nun mit einer weiteren Messung mit den Lasertriangulationssensoren übereinstimmen. Der Kippwinkel wird dazu über 5 Sekunden bei der gewählten Abtastrate der Sensoren von 1,5 kHz zu jedem Abtastschritt berechnet und über die gesamte Messzeit gemittelt. Der auf diese Weise berechnete Kippwinkel von $2,5^\circ$ deckt sich sehr gut mit dem in Formel (31) analytisch berechneten Winkel von $2,55^\circ$.

In weiteren Versuchen wird der Einsatz dieser Methode in einer realen Quetschsituation gezeigt. Es werden zwei Grenzfälle betrachtet, die in Tabelle 8.1 aufgelistet sind.

Bezeichnung	l_{px} [mm]	l_{py} [mm]	Zuladung [kg]	Zuladungsposition (x/y) [mm]	Schaumstoffprüfling (Härte)
A	115	282	Keine	-	Hart
B	115	282	50	(900/900)	Weich

Tabelle 8.1: Experimente zur Validierung Kollisionserkennung basierend auf der Verkippung der Tischplatte; Abstandsangaben beziehen sich auf das bemaßte Koordinatensystem in Abbildung 8.1; alle Experimente werden bei Abwärtsfahrt durchgeführt

Abbildung 8.4 zeigt den zeitsynchronen Verlauf des Kippwinkels und der Kontaktkraft für Experiment A lt. Tabelle 8.1.

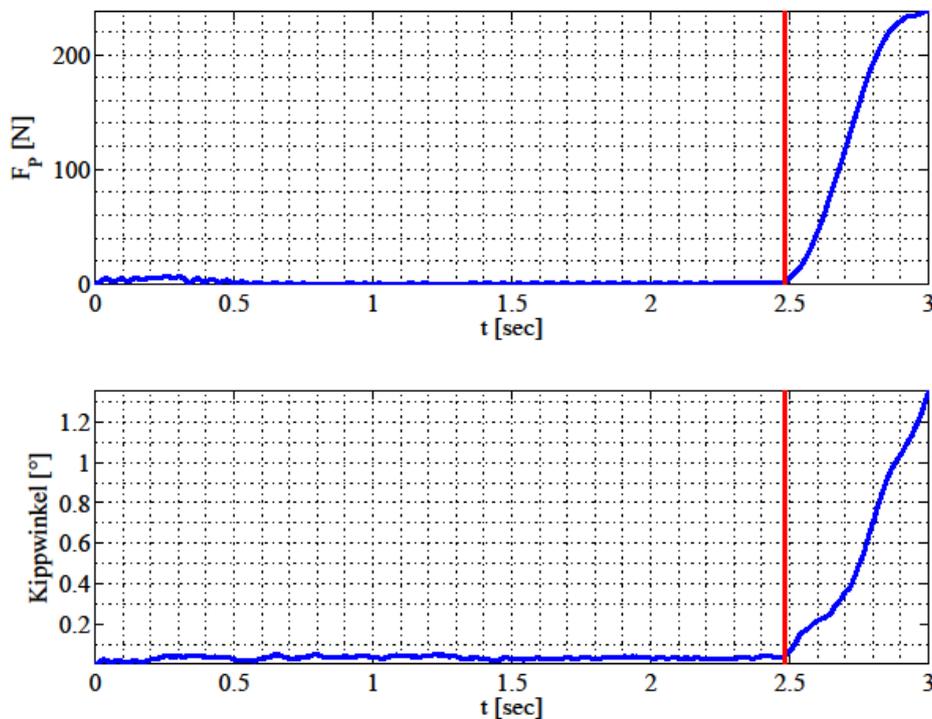


Abbildung 8.4: Zeitsynchrone Verläufe von Kippwinkel und Kontaktkraft für Experiment A lt. Tabelle 8.1; Darstellung ab dem Beginn der Fahrt; die rote Linie zeigt den Zeitpunkt an dem das gequetschte Objekt berührt wird; im Falle einer Kollision des unbeladenen Tisches mit einem harten Objekt folgt der Kippwinkel der Kontaktkraft deutlich und verzögerungsfrei

Der Verlauf des Kippwinkels ist, wie Abbildung 8.4 verdeutlicht, ab dem Moment des Losfahrens von Null verschieden. Dies ist nicht nur auf Vibrationen des Tisches während der Fahrt zurückzuführen, sondern auch auf die Tatsache, dass sich die Tischplatte aufgrund der Führung durch die teleskopartigen Beine in unterschiedlichen Höhen neu ausrichtet. Die verwendete Konfiguration A lt. Tabelle 8.1 für das Experiment, ein hartes Objekt wird vom unbeladenen Tisch gequetscht, stellt den besten Fall für den Zusammenhang zwischen Kontaktkraft und Kippwinkel dar. Da sich der Quetschprüfling unter Krafteinfluss kaum verformt, folgt der Kippwinkel der Tischplatte der ansteigenden Kraft verzögerungsfrei.

Der Worst-Case wird bei Konfiguration B lt. Tabelle 8.1, der Kollision des schwer beladenen Tisches mit einem sehr weichen Objekt, erreicht und in Abbildung 8.5 dargestellt.

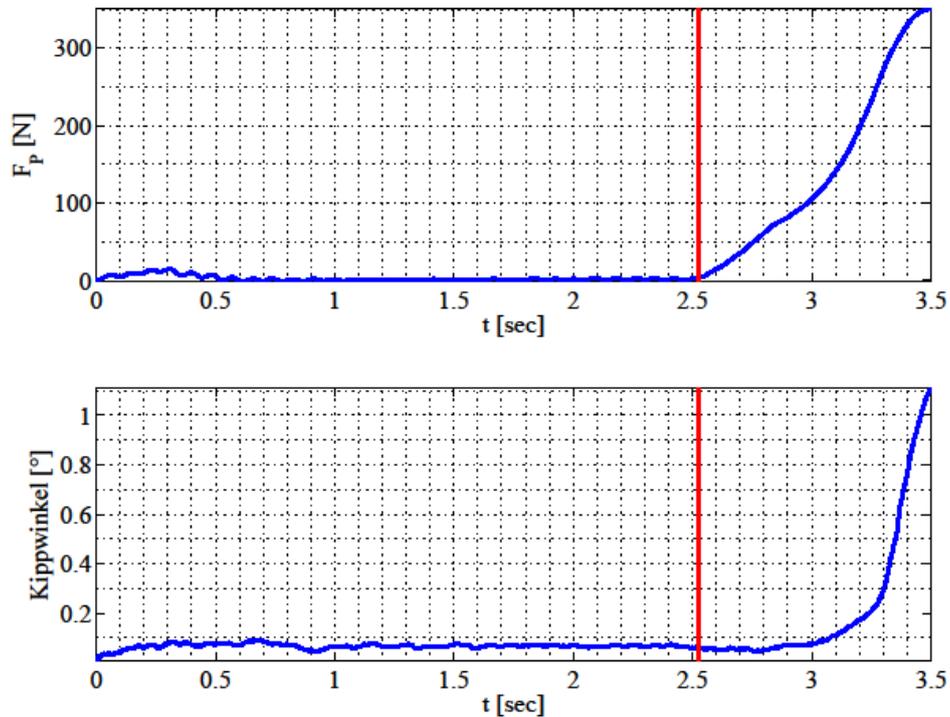


Abbildung 8.5: Zeitsynchrone Verläufe von Kippwinkel und Kontaktkraft für Experiment B lt. Tabelle 8.1; Darstellung ab dem Beginn der Fahrt; die rote Linie zeigt den Zeitpunkt an dem das gequetschte Objekt berührt wird; im Falle einer Kollision des beladenen Tisches mit einem weichen Objekt folgt der Kippwinkel der Kontaktkraft erst beim Erreichen hoher Kräfte und daher zeitverzögert zur Kollision

Im Falle einer schweren Beladung des Tisches und einer Quetschung eines weichen Objektes erfolgt der Anstieg des Kippwinkels stark zeitversetzt. Begründet wird dies durch die Tatsache, dass die beladene Tischplatte erst mit erhöhtem Kräfteinsatz um den metallischen Querträger gekippt werden kann, da die schwere Beladung ein Gegenmoment erzeugt. Zusätzlich wird der Quetschprüfling stark komprimiert bevor die Tischplatte kippt.

8.1.3 Diskussion

Wird das gezeigte System zur Ermittlung des Kippwinkels der Tischplatte zur Detektion eines Quetschereignisses eingesetzt, nutzt es den Effekt, dass es beim Kontakt des Tisches mit einem gequetschten Objekt zu einer Verkippung der Tischplatte kommt. Selbst wenn der metallische Unterbau und nicht die Tischplatte selbst berührt wird, ändert die vermessene Ebene ihren Winkel zur Hochachse. Da bei den durchgeführten Grenzbetrachtungen jedoch zu Tage kommt, welchen Einfluss die Beladung und der Prüfkörper auf das Ergebnis haben, sind ausgedehnte Analysen und eine umfangreiche Kalibrierung des Zusammenhangs zwischen Kippwinkel und Kontaktkraft nötig. Der Einsatz von Lasertriangulationssensoren ist, wie bereits bei der Auswahl dieser Geräte in Kapitel 5.2.2 erwähnt als, Referenzmessung zu sehen, da das zugrunde liegende

Messprinzip zwar hochgenaue Ergebnisse liefert, aber für einen Einsatz im Feld zu teuer ist. Zudem kann mit dem eingesetzten Sensortyp nur ein eingeschränkter Bereich des Verfahrwegs geschützt werden.

8.2 Einsatz von Beschleunigungssensoren zur Ermittlung der Lage der Tischplatte

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie der Kippwinkel der Tischplatte unter Einsatz von Beschleunigungssensoren ermittelt werden kann.

8.2.1 Grundlagen

Ausgehend von einem Zeitsignal der Beschleunigung ermöglichen die folgenden Zusammenhänge das Berechnen eines Wegprofils (s-t-Diagramm).

$$v(t) = \int_{t_0}^{t_1} a(\tau) d\tau + v_0 \quad (32)$$

Durch Integration der Beschleunigung nach der Zeit wird ein Geschwindigkeitsprofil berechnet. Unter der Annahme, dass sich der Tisch zu Beginn der Messung in Ruhe befindet, ist die Geschwindigkeit zu Beginn der Messung Null. kann v_0 aus Gleichung (32) entfernt werden.

$$v(t) = \int_{t_0}^{t_1} a(\tau) d\tau \quad (33)$$

Durch Integration der Geschwindigkeit erhält man das Wegprofil.

$$s(t) = \int_{t_0}^{t_1} v(\tau) d\tau + s_0 \quad (34)$$

Dabei wird die Konstante s_0 wie zuvor Null gesetzt wird, da in weiterer Folge nur die Relativbewegungen betrachtet und keine Absolutgrößen benötigt werden.

$$s(t) = \int_{t_0}^{t_1} v(\tau) d\tau \quad (35)$$

Werden drei Beschleunigungssensoren auf dieselben Punkte der Tischplatte aufgebracht, die in Kapitel 8.1 mit den Lasertriangulationssensoren vermessen werden, kann unter Verwendung der vorgestellten Gleichungen (24) bis (27) wieder auf den Kippwinkel der Tischplattenebene geschlossen werden. In die Berechnung fließen wiederum die bekannten Abstände aus Abbildung 8.1 ein.

8.2.2 Einschränkungen aufgrund der Sensorik

Bei der Funktionsüberprüfung mit den Piezo-Beschleunigungssensoren werden einige Probleme offensichtlich. Im ersten Schritt der Funktionsüberprüfung wird gezeigt, wie sich die Doppelintegration verhält, wenn der Tisch nicht bewegt wird und sich der Sensor daher in Ruhe befindet. Das Ergebnis $s(t)$ muss in diesem Fall über den gesamten Zeitraum Null sein, das Wegprofil zeigt jedoch eine Parabelform. Dies kann auf einen konstanten Offset im Beschleunigungssignal zurückgeführt werden:

$$a = \text{const.} \xrightarrow{\text{Integration}} v = a \cdot t \xrightarrow{\text{Integration}} s = \frac{a}{2} t^2$$

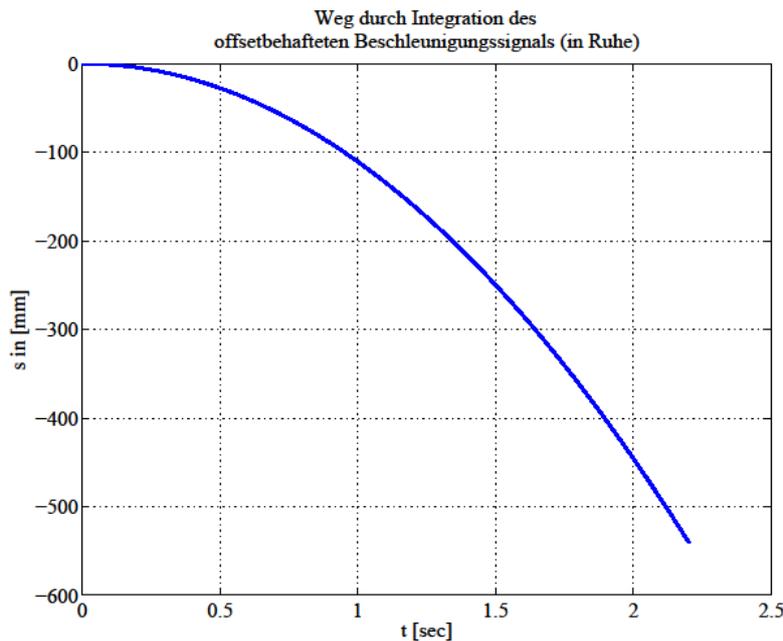


Abbildung 8.6: Wird das Beschleunigungssignal mit konstantem Offset zweimal integriert entsteht eine Parabel

Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate kann der Offset aus der in Abbildung 8.6 gezeigten Parabel geschätzt werden, danach wird dieser berechnete Wert vom Beschleunigungssignal abgezogen und die Doppelintegration erneut ausgeführt. Trotz dieser Offsetbereinigung bleibt für den Sensor in Ruhe ein zeitveränderliches Wegsignal übrig. Die Drift liegt in der Größenordnung von einigen mm/s, dies wird durch Abbildung 8.7 verdeutlicht. Der Signalausschnitt müsste eine Nulllinie zeigen, da sich das System in Ruhe befindet. Daher ist damit zu rechnen, dass die eingesetzten Beschleunigungssensoren kein brauchbares Ergebnis liefern. Das Wegprofil während der Fahrt in Abbildung 8.8 entspricht nicht der Realität, da der zurückgelegte Weg der Tischplatte mit einer Geschwindigkeit von ca. 45 mm/sec konstant zunimmt. Genau dieser reale Wegverlauf wird in Abbildung 8.9 gezeigt. Um die grundsätzliche Funktion des Aufbaus zu evaluieren, werden Versuche mit einem Shaker durchgeführt, dessen Anregung wird von einem steuerbaren Netzteil vorgenommen. Mit einem Frequenzgenerator können an einem Steuereingang des Netzteils

Spannungsverläufe vorgegeben werden. Es zeigt sich, dass das System für höhere Schwingfrequenzen im kHz-Bereich funktioniert. Daher kann diese Drift darauf zurückgeführt werden, dass sich das Nutzsignal in einem Frequenzbereich befindet, für den der Piezo-Beschleunigungssensor, aufgrund seines Aufbaus und des zugrundeliegenden Piezo-Effekt, ungeeignet ist.

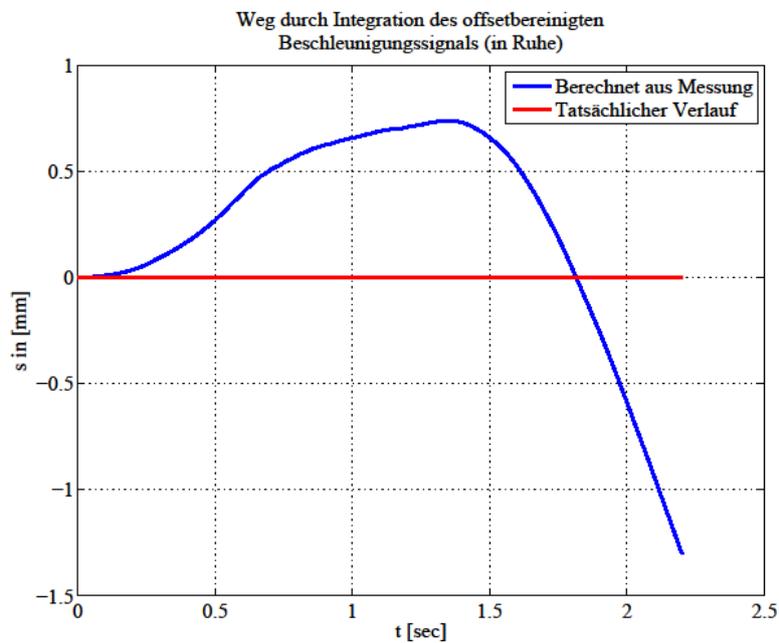


Abbildung 8.7: Nach Bereinigung des konstanten Offsets im Beschleunigungssignal liefert die Doppelintegration ein driftendes Wegsignal für das System in Ruhe (blaue Linie); da sich der Tisch in Ruhe nicht bewegt, sollte der Wegverlauf über die Zeit konstant Null sein (rote Linie)

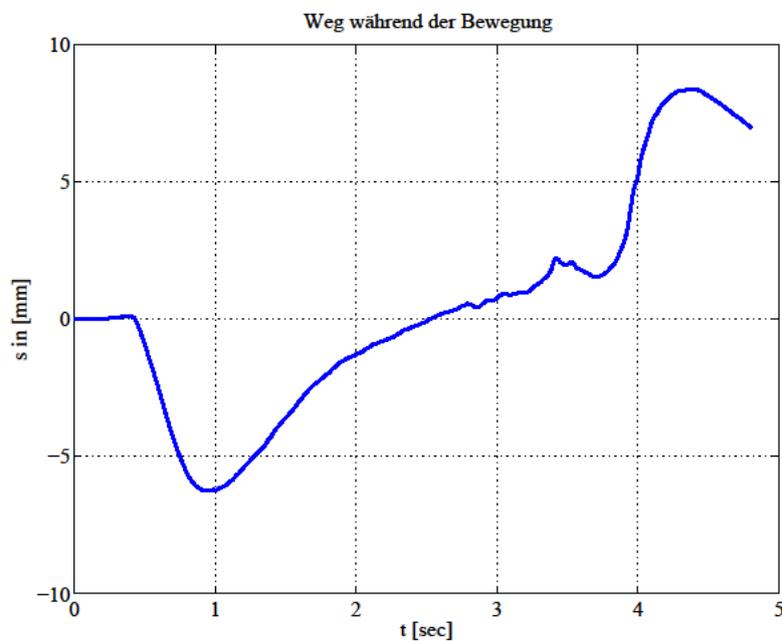


Abbildung 8.8: Das mit dem Beschleunigungssignal berechnete Wegprofil während der Fahrt entspricht nicht dem des realen Systems; hier wurde der Piezo-Beschleunigungssensor eingesetzt

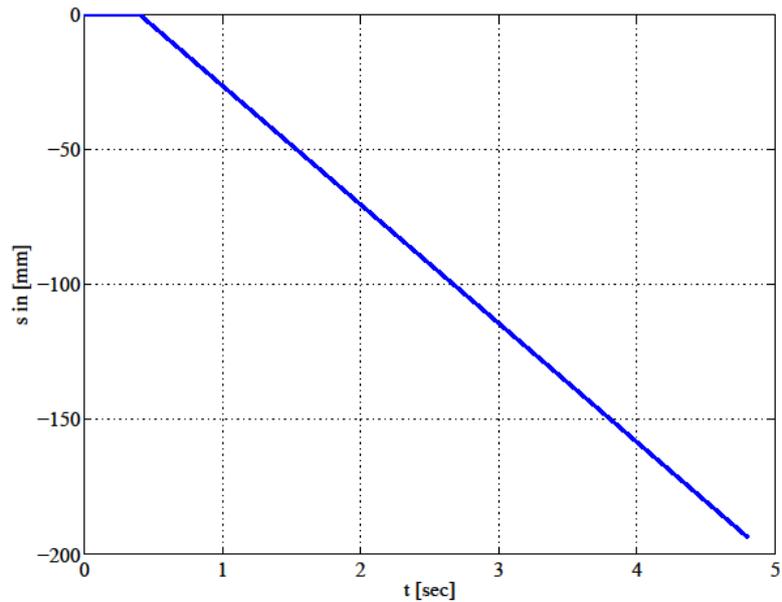


Abbildung 8.9: Das tatsächliche Wegprofil für die Abwärtsfahrt des Tisches; die Geschwindigkeit beträgt 44 mm/sec; diese Bewegung wird mit dem auf der Tischplatte angebrachten Piezo-Beschleunigungssensor durchgeführt, daher müsste das in Abbildung 8.8 gezeigte Wegprofil wie in dieser Abbildung aussehen

Nachdem gezeigt wird, dass sich Piezo-Beschleunigungssensoren nicht dazu eignen, ein Wegprofil für die bewegte Tischplatte aufzunehmen, werden die Versuche mit MEMS-Beschleunigungssensoren wiederholt. Auch in diesem Fall ist das Signal mit einem konstanten Offset überlagert, der mit der zuvor gezeigten Offsetbereinigung entfernt werden kann.

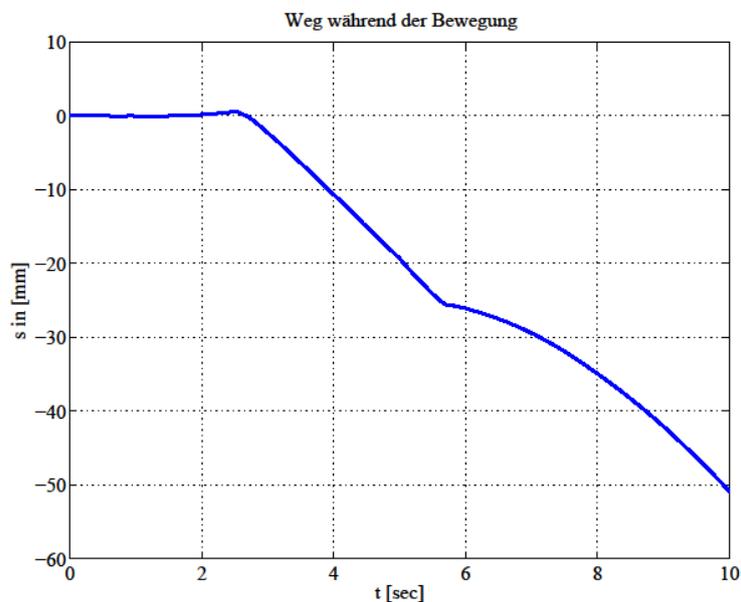


Abbildung 8.10: Das mit dem Beschleunigungssignal berechnete Wegprofil während der Fahrt entspricht nicht dem des realen Systems; hier wurde der MEMS-Beschleunigungssensor eingesetzt

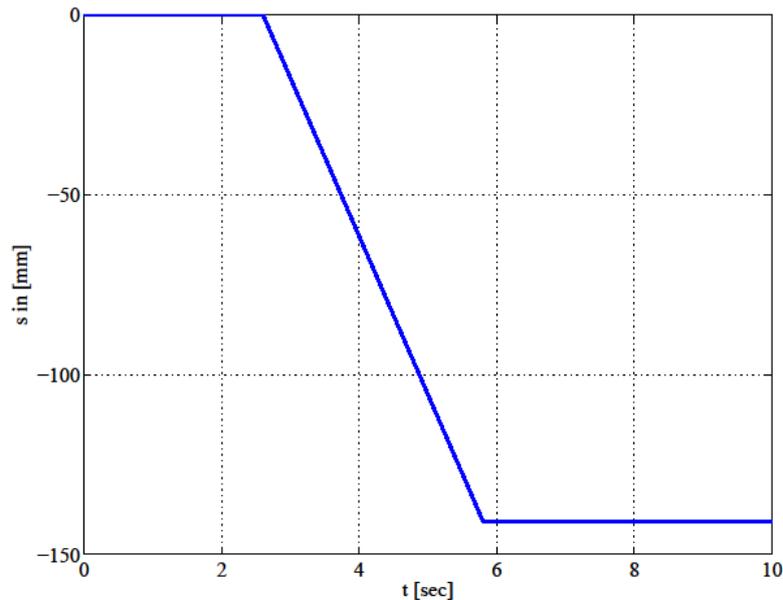


Abbildung 8.11: Der reale, mit dem MEMS-Beschleunigungssensor zurückgelegte Weg bei der Abwärtsbewegung der Tischplatte; die Geschwindigkeit beträgt 44 mm/sec; das in Abbildung 8.10 gezeigte Wegprofil müsste wie in dieser Abbildung aussehen

Wie Abbildung 8.10 zeigt, ist das Wegprofil bei Stillstand des Tisches annähernd Null und nimmt während der Abwärtsfahrt konstant ab. Sobald die Motoren stoppen driftet das Signal ab und bleibt nicht konstant. Da der tatsächlich zurückgelegte Weg gemäß Abbildung 8.11 jedoch nicht mit dem berechneten Weg in Abbildung 8.10 übereinstimmt, muss davon ausgegangen werden, dass auch der verwendete MEMS-Beschleunigungssensor ADXL330 für die Messaufgabe nicht geeignet ist. Auch dieser Sensor hat, ähnlich zu den Piezo-Beschleunigungssensoren, eine untere Grenzfrequenz im Bereich 0,5 – 1 Hz, jedoch befindet sich die zu messende Beschleunigung auch unter dieser Grenze.

8.2.3 Diskussion

Die Funktionsüberprüfung zeigt, dass der Einsatz von Piezo-Beschleunigungssensoren keine Ergebnisse liefern kann, die zur Berechnung eines Wegprofils herangezogen werden können. Dies kann durch den Ladungsabfluss von Piezo-Kristallen, der bei niedrigen Frequenzen Probleme bereitet, erklärt werden. Die Berechnungen eines Wegprofils für die Tischplatte scheitern auch bei Einsatz günstiger Beschleunigungssensoren auf MEMS-Basis, da auch diese Sensoren eine untere Grenzfrequenz besitzen. Dementsprechend ergeben sich die gezeigten Probleme, da sich das Nutzsignal ebenfalls in diesem niedrigen Frequenzbereich befinden kann.

Die Probleme der Beschleunigungssensorik könnte man beispielsweise durch Einsatz von Sensoren mit höherer Messgenauigkeit für niedrige Frequenzen oder durch Einsatz eines einzigen 3D-Gyrosensors zur Messung von Winkelbeschleunigungen um drei Raumachsen beheben. Mit einem Gyrosensor kann direkt auf das Kippen der Tischplatte geschlossen werden, da durch Rotationsbewegungen hervorgerufene Beschleunigungen gemessen werden.

Doch selbst wenn die Sensorik einwandfrei funktioniert ändert sich nichts an der Tatsache, dass die Auslenkung der Tischplattenverkippung sehr stark von der Beladung und von den eingeklemmten Objekten abhängt. Das bedeutet, dass sich ein zuverlässiger Quetschdetektor auf Basis des Kippwinkels nicht implementieren lässt, da viele weitere Parameter eine sehr große Rolle spielen. Dazu gehören in erster Linie die Zuladung des Tisches und deren Position, die mechanischen Eigenschaften des geklemmten Prüfkörpers sowie die Kontaktposition bei der Kollision. Ist der Tisch schwer beladen, wird für das Erreichen desselben Kippwinkels wie im unbeladenen Fall eine deutlich höhere Kontaktkraft nötig sein. Somit ist es nicht möglich einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Kontaktkraft und Kippwinkel zu ermitteln, ohne die, im Allgemeinen unbekannte Tischbeladung, zu berücksichtigen. Eine simultane Messung der Zuladung, die dieses Problem löst, führt zur in Kapitel 7 vorgestellten Methode. Da sich die Gewichtsmessung selbst wesentlich besser zur Ermittlung der Kontaktkraft eignet wird somit die Messung des Kippwinkels als Quetschdetektor überflüssig. Die Kollision mit einem harten Objekt stellt dem Tisch während der Hubbewegung einen hohen Widerstand entgegen, während die Federwirkung eines weichen Objekts das Kippverhalten des Tisches deutlich dämpft und die Verkippung der Tischplatte weniger stark ausgeprägt sein wird. Die Kollisionsposition beeinflusst den Kippwinkel ebenfalls, denn der Abstand zu jener Achse, um die der Tisch kippt, geht linear in das Kippmoment ein.

8.3 Aufpralldetektion mit Körperschallmessung

Die im Abschlussbericht [7] des Product Innovation Project vorgestellte Körperschallmessung zeigt, dass der Einsatz von MEMS-Beschleunigungssensoren in einem Prototyp für einen eingeschränkten Satz von Experimenten brauchbare Ergebnisse liefert. Um die Leistungsfähigkeit der Körperschallmessung unter verschiedenen Einflüssen zu analysieren, werden die Versuche aus [7] mit verschiedenen Tischbeladungen und Quetschprüflingen wiederholt. Die Beschleunigung wird dabei nicht in Bewegungsrichtung des Tisches (z-Richtung), sondern in der Tischebene (x-y-Ebene) gemessen. Ein derartiger Messaufbau entspricht einer Körperschallmessung, denn es werden die Vibrationen in der Ebene erfasst, die durch den Aufprall von Objekten erzeugt werden. Diese kollisionsbedingten Erschütterungen generieren das Nutzsignal, außerdem ist zu erwarten, dass auch einige Störquellen das Signal beeinflussen werden. Zu diesen Störern gehört in erster Linie die mechanische Schwingungsanregung durch das Antriebssystem. Mit einer Schwellwertoperation, die direkt auf die Beschleunigungssignale in der Tischplattebene angewendet wird, kann eine Entscheidung getroffen werden ob sich der Tisch im Normalzustand befindet oder ob der Tisch auf ein Objekt aufgefahren ist. Dieses Signalmodell wird in Abbildung 8.12 dargestellt.

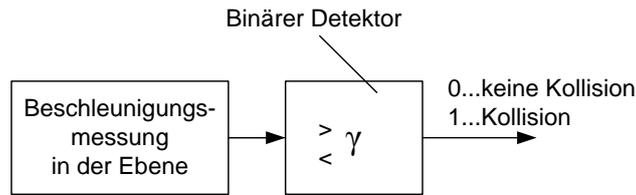


Abbildung 8.12: Signalfluss zur Detektion einer Kollision basierend auf der Körperschallmessung; die Beschleunigungswerte in der Tischplattenebene werden gemessen und ein binärer Detektor entscheidet entsprechend einer eingestellten Schwelle ob eine Kollision vorliegt oder nicht

Zur Analyse der Körperschallmessung werden experimentell Grenzbetrachtungen für unterschiedliche Härtegrade der eingeklemmten Prüfkörper durchgeführt. Diese Versuche werden in Tabelle 8.2 zusammengefasst.

Bezeichnung	l_{px} [mm]	l_{py} [mm]	Schaumstoffprüfling (Härte)
A	115	282	Hart
B	115	282	Weich

Tabelle 8.2: Experimente zur Validierung Kollisionserkennung basierend auf der Körperschallmessung; Abstandsangaben beziehen sich auf das bemaßte Koordinatensystem in Abbildung 8.1; alle Experimente werden bei Abwärtsfahrt durchgeführt

Abbildung 8.13 zeigt das Beschleunigungssignal in y-Richtung des in Abbildung 8.1 eingeführten Koordinatensystems für das Experiment A gemäß Tabelle 8.2. Das Auffahren auf ein hartes Objekt stellt den günstigsten Fall für die Detektion einer Quetschung dar. Das Signal hebt sich beim Quetschereignis bei $t = 3$ sec von den Vibrationen während der Konstantfahrt um einen Faktor 6 ab. Deutlich zu sehen ist, dass auch das Anfahren der Antriebe bei $t = 0.6$ sec einen Stoß verursacht. Dies kann bei einer empfindlichen Schwellwertoperation als Quetschung fehlinterpretiert werden.

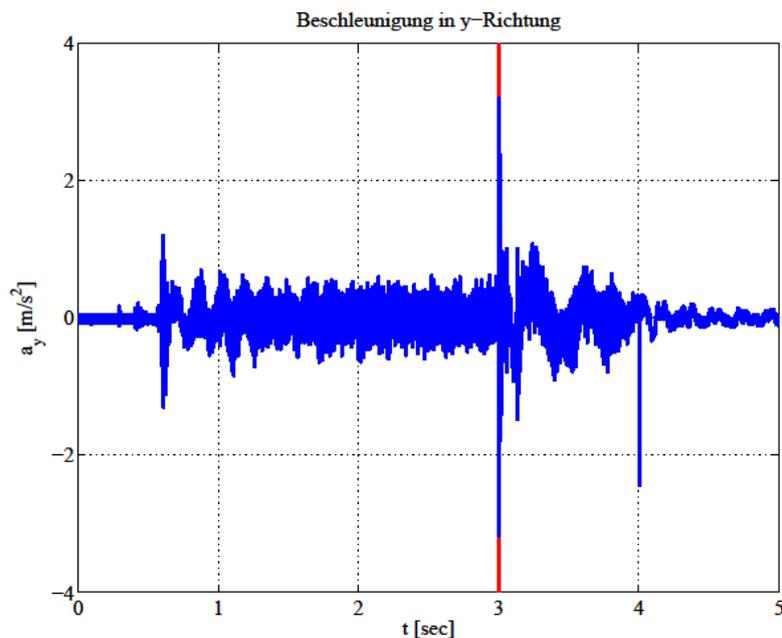


Abbildung 8.13: Körperschallmessung durch Beschleunigungsmessung in y-Richtung; das Quetschereignis bei $t=3$ sec hebt sich deutlich von den Vibrationen während der Fahrt ab

Wird der Versuch mit der Versuchskonfiguration B wiederholt, stellt dies die Worst-Case-Kombination für die Kollisionsdetektion basierend auf Körperschallmessung dar. Für den beladenen Tisch und das sehr weiche Quetschobjekt geht die Kollision in den Vibrationen während der Fahrt unter und lässt sich, wie Abbildung 8.14 verdeutlicht, nicht detektieren.

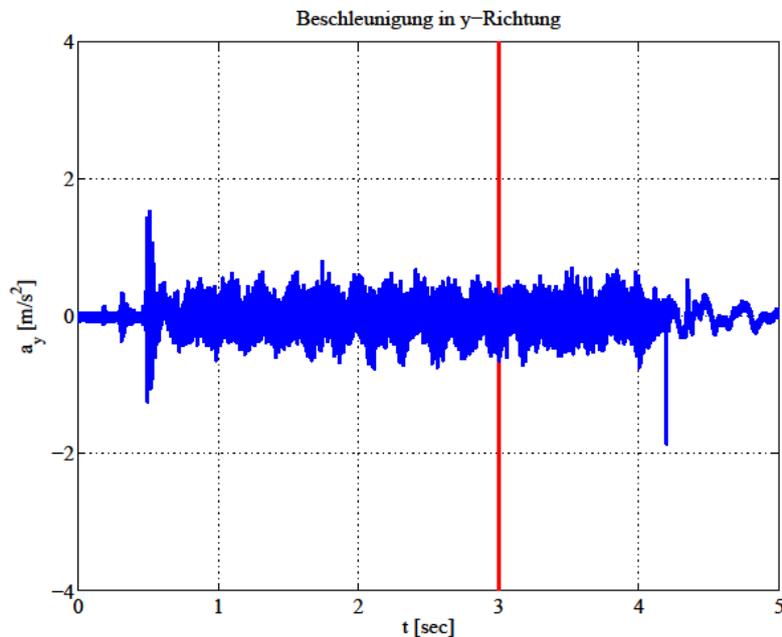


Abbildung 8.14: Körperschallmessung durch Beschleunigungsmessung in y-Richtung; das Quetschereignis bei $t=3$ sec geht in den Vibrationen während der Fahrt unter

8.3.1 Diskussion

Wie aus den Grenzbetrachtungen hervorgeht, liefert die Körperschallmessung keine Ergebnisse, die bei weichen Prüflingen die Detektion einer Kollision ermöglichen. Neben diesem grundlegenden Problem ist auch die Wahl einer Abschaltchwelle problematisch, da man keinen direkten Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und der Beschleunigung beim Aufprall herstellen kann. Eine Signaländerung bei der Kollision wird lediglich durch die Erschütterung beim Aufprall hervorgerufen und steht in keinem ursächlichen Zusammenhang mit der Kontaktkraft. Das bedeutet, dass sich die Körperschallmessung lediglich zur Detektion von Kollisionen mit Objekten eignet, die die Tischplatte deutlich in Schwingung versetzen. Da dies in erster Linie harte Objekte sind, kann kein universeller Quetschutz implementiert werden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit werden verschiedene messtechnische Einrichtungen zur Kollisionserkennung einer bewegten, höhenverstellbaren Tischplatte eines Bürotisches mit einem Hindernis experimentell untersucht. Als Ausgangspunkt dient eine Analyse des Stands der Technik von Quetschschutzeinrichtungen, die bereits zum Schutz elektrisch höhenverstellbarer Tische oder in anderen Anwendungen zum Einsatz kommen. Die von einer Kontaktkraft, die sich bei einer Kollision aufbaut, beeinflussten Größen werden in weiterer Folge kategorisiert, sodass direkte und indirekte Verfahren zur Ermittlung dieser Kraft abgeleitet werden können. Die zur Untersuchung der ausgewählten Verfahren benötigten physikalischen Größen werden mit Sensoren und Datenerfassungssystemen in Experimenten auf einem Prüfstand gemessen, die Messwerte werden danach so weiterverarbeitet, dass die Detektion einer Kollision ermöglicht wird. Mit ROC-Kurven bzw. der Betrachtung von Grenzfällen wird die Analyse der Verfahren durchgeführt, sodass abschließend eine Einsatzempfehlung abgegeben werden kann.

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass derzeit am Markt sowohl direkte als auch indirekte Verfahren zur Bestimmung einer Kontaktkraft zum Einsatz kommen. In der Diplomarbeit werden in Kapitel 7 zwei direkte und in Kapitel 8 drei indirekte Verfahren vorgestellt. Die Experimente zeigen, dass das beste Resultat mit der Auflagerkraftmessung aus Kapitel 7.1 erzielt werden kann. Bezogen auf die Funktionalität hat dieses Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft keine Einschränkungen, es liefert unabhängig von der Beladung des Tisches und von den mechanischen Eigenschaften des eingeklemmten Objekts gleichmäßig gute Ergebnisse. Der gesamte Bewegungszyklus von der Beschleunigungs- bis zur Verzögerungsphase der Tischplatte kann in beide Bewegungsrichtungen abgesichert werden.

9.1 Direkte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft

Die Messung der Auflagerkräfte ist ein direktes Verfahren und ermöglicht eine sehr genaue und schnelle Erkennung von Kollisionen, außerdem wird die Beladung des Tisches berücksichtigt, was eine Lastunabhängigkeit der Detektion ermöglicht. Die vorgestellte Methode benötigt vier Wägezellen und je einen DMS-Messverstärker zur Messung der absoluten Beladung der Wägeeinrichtungen. Mit den Gesetzen der Statik kann direkt die Kontaktkraft berechnet werden, ein Schwellwertdetektor kann für die durchgeführten Experimente innerhalb von 100 ms nach der Kollision Kräfte im Bereich von 20-30 N mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % detektieren ohne dabei auf falsch positive Detektionen anfällig zu sein. Dieses gute Ergebnis wird bei den durchgeführten Versuchen trotz Variation der Einflussgrößen Zuladung, Zuladungsposition, Kollisionsposition und Härte des geklemmten Objektes erreicht, daher ist davon auszugehen, dass das Verfahren im Feldeinsatz ebenfalls gut funktionieren kann.

Die Berechnung der Kontaktkraft zeigt keine Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der Detektion, wenn sich der Tisch aufwärts oder abwärts bewegt, daher ist dieses Verfahren auch in dieser Hinsicht universell einsetzbar. Die Lokalisierung des Kontaktpunktes, das ist jener Punkt an dem die Kontaktkraft zum Beispiel bei einer Kollision einwirkt, kann ohne Berücksichtigung dynamischer Vorgänge und mechanischer Eigenschaften des Tisches während der Fahrt nicht vorgenommen werden. In erster Linie erweist sich die Verformbarkeit der Tischkomponenten für die Berechnung des Kontaktpunktes als problematisch, mit einem stereostatischen Modell kann dieser Einfluss jedoch nicht berücksichtigt werden. Für das Verfahren zur Berechnung der Kontaktkraft aus einer Auflagerkraftmessung ergeben sich auch einige Nachteile. Hier sind in erster Linie die aufwändige Integration der Sensorik in den Tisch und der Preis für die Messtechnik zu nennen, dem Auftraggeber wird daher an dieser Stelle eine Wirtschaftlichkeitsanalyse empfohlen.

Mit der Motorstrommessung kann auf die Gewichtsbelastungen der Tischbeine und in weiterer Folge auf Laständerungen durch Kollisionen geschlossen werden. Dazu wird ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden erwähnten Größen aufgestellt, die Modellparameter werden aus einer Versuchsreihe geschätzt. Daher operiert dieses Verfahren in weiterer Folge ebenfalls in der Domäne Kraft. Zum Unterdrücken des Quantisierungsrauschens, das durch die A/D-Umsetzung in der Motorstrommessung eingeführt wird, ist eine Signalglättung nötig. Um einen binären Detektor zur Kollisionserkennung unabhängig vom Beladungszustand des Tisches mit einem definierten Schwellwert zu betreiben, ist eine Mittelwertbefreiung der Kraftsignale nötig. Grundsätzlich eignet sich dieses Verfahren nur für den Schutz jenes Zeitraums, in dem sich das Antriebssystem im stationären Zustand befindet, da es für die Einschaltströme keine gültigen Werte liefert. Die Receiver-Operating-Characteristic zeigt, dass das Ergebnis schlechter als bei der zuvor vorgestellten Auflagerkraftmessung ist. Einerseits müssen längere Ansprechzeiten für die Detektion in Kauf genommen werden, andererseits verursachen einige Störer eine höhere Wahrscheinlichkeit falsch positiver Detektionen während der Fahrt. Zu diesen Störeinflüssen zählen in erster Linie die Auswirkungen der mechanischen Bremse der Antriebseinheiten auf die Regelung, und damit auch auf den Motorstrom. Ein weiterer Grund für falsch positive Detektionen ist die Regelung selbst, da die Hubbewegung nicht ruhig verläuft und schwingende Bewegungen während der Fahrt in direktem Zusammenhang mit den beobachteten Schwingungen im Stromsignal stehen. Die Linearantriebe verhalten sich aufgrund konstruktiver Einflüsse bei der Aufwärts- und Abwärtsbewegung unterschiedlich, Stromanstiege sind bei der Aufwärtsfahrt deutlicher ausgeprägt. Dies ermöglicht eine bessere Detektor-Performance in dieser Bewegungsrichtung. Die Hardware für dieses Verfahren ist bereits in die Steuerung integriert und der Softwareaufwand ist gering, daher kann mit einfachen Mitteln ein Quetschschutzsystem implementiert werden, das sich zumindest als Basisschutz für die mechanischen Komponenten eignet.

9.2 Indirekte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft

Die indirekten Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft in Kapitel 8 beruhen einerseits auf der Tatsache, dass die Tischplatte unter Krafteinwirkung kippt und andererseits eine Kollision die Platte erschüttert und zur Schwingung anregt. Zu beachten ist dabei jedoch, dass die Beladung der Tischplatte und deren Position, die Kollisionsposition und die mechanischen Eigenschaften des geklemmten Objekts die der Kollisionserkennung zugrundeliegenden physikalischen Größen stark beeinflussen.

Der Kippwinkel der Tischplatte wird in den Experimenten ausgehend von einer Abstandsmessung und einer Beschleunigungsmessung berechnet. Zur Referenzmessung des Kippwinkels dienen drei Lasertriangulationssensoren, mit denen drei Punkte der Tischplatte während der Fahrt vermessen werden. Die Rekonstruktion der durch diese Punkte aufgespannten Ebene liefert in weiterer Folge den Kippwinkel unter Einfluss der Kontaktkraft. Die teuren Sensoren werden nur für den Laboreinsatz verwendet um die prinzipielle Leistungsfähigkeit von Verfahren zu erheben, die als Grundlage die Verkippung der Tischplatte nutzen. Mit den untersuchten Beschleunigungssensoren ist es nicht möglich, die Winkelberechnung der Referenzmessung nachzubilden. Der Grund hierfür ist in erster Linie das Verhalten der Sensoren bei niedrigen Signalfrequenzen. Die Signaldrift der Piezo-Beschleunigungssensoren entsteht durch den Ladungsausgleich der Kristalle, aber auch die verwendeten MEMS-Sensoren weisen eine untere Grenzfrequenz auf. Selbst wenn ein Beschleunigungssensor ausgewählt werden kann mit dem es möglich ist, ein Wegprofil zu berechnen, bleibt das grundlegende Problem dieses indirekten Verfahrens bestehen, das auch im Rahmen der Referenzmessungen ermittelt wurde. Es zeigt sich nämlich deutlich die starke Abhängigkeit des Kippwinkels von der Beladung des Tisches und von der Härte der gequetschten Objekte. Im schlimmsten Fall kippt die Tischplatte erst wenn die Kontaktkraft 300 N oder mehr erreicht. Durch diese grundlegende Einschränkung liefert die Winkelberechnung selbst unter Einsatz der hochgenauen Messung mit den Lasertriangulationssensoren keine Ergebnisse, die in verschiedenen Betriebsfällen des Tisches die Detektion einer Kollision ermöglichen. Das Kippverhalten der Tischplatte ist bei Auf- und Abwärtsfahrt gleich, die Drehrichtung des Gegenmoments, das durch die Beladung entsteht, ist aber abhängig von der Lage der Last im Bezug auf die Drehachse der Tischplatte. Daher wird von Verfahren abgeraten, die als Ausgangspunkt der Kollisionserkennung den Kippwinkel der Tischplatte nutzen. Ein hochempfindlicher Detektor, der in jedem Lastfall gleiches Ansprechverhalten bei Kollisionen mit unterschiedlichen Objekten aufweist, kann nicht implementiert werden.

Die Körperschallmessung, die im Abschlussbericht eines Studentenprojekts erstmals vorgeschlagen wird, zeigt eine starke Abhängigkeit des Beschleunigungssignals von den Eigenschaften der gequetschten Objekte. Es ist nicht möglich, Kollisionen mit Prüflingen zu detektieren, die die Tischplatte bei Berührung nicht ausreichend in Schwingung versetzen. Dabei handelt es sich vornehmlich um weiche Objekte, deren Kontakt mit der Tischplatte im Quetschfall keine messbaren Erschütterungen der Tischplatte hervorruft, daher können diese Kollisionen mit der Körperschallmessung nicht detektiert werden. Selbst das Auffahren auf harte Objekte wird nur dann erkannt, wenn der Sensor möglichst ungedämpft mit der Tischplatte verbunden ist. Die Wahl eines geeigneten Schwellwerts geschieht hier unabhängig von der Kontaktkraft, denn die Signalauslenkung hängt nur von der Beschaffenheit des gequetschten Objekts und nicht von Kräften bei der Kollision ab.

9.3 Ausblick

Die Analyse des Verfahrens zur Bestimmung der Kontaktposition mit Hilfe der Auflagerkraftmessung zeigt, dass diese Lokalisierung während der Fahrt problematisch ist, im Ruhezustand für die durchgeführten Experimente jedoch sehr gute Ergebnisse liefert. Aufgrund dieser Tatsache ist es denkbar, dieses Verfahren als Basis für ein Bedienelement zu nutzen. Auf der Tischplatte wird eine sensitive Fläche definiert und gekennzeichnet, drückt der Benutzer die Platte in diesem Bereich nach unten, startet der Tisch eine Abwärtsbewegung. Drückt der Benutzer die Unterseite der Tischplatte in diesem Areal nach oben, fährt der Tisch nach oben. Grundlage hierfür sind sowohl die vorgestellte Berechnung der Kontaktposition, als auch die Bestimmung der Kontaktkraft. Damit kann die Funktion einerseits auf eine definierte Fläche beschränkt werden und andererseits das Auslösen und die Richtungswahl über einen Kraftschwellwert und die Krafrichtung gesteuert werden. Die Kombination dieser Technik mit einem konventionellen Schaltelement, beispielsweise mit einem Fußtaster, ist aus Sicherheitsgründen empfehlenswert. Das aktuelle Bedienkonzept des Steuergeräts für die Antriebe enthält in der Minimalconfiguration einen Handschalter mit je einer Taste zur Abwärts- und Aufwärtsfahrt. Die Taste für die gewünschte Bewegungsrichtung muss so lange gedrückt werden, bis die gewünschte Position erreicht ist. Wird dieses Eingabeverhalten auf die Wägetechnik-Bedieneinrichtung umgelegt, muss der Benutzer während der gesamten Fahrt eine Kraft auf die Tischplatte ausüben. Im Allgemeinen kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass der Benutzer eine über die Fahrzeit konstante Kraft ausüben kann. Im Fall des simultanen Einsatzes dieser Bedienteiltechnik und der Quetschutztechnik sind daher weitere Untersuchungen nötig, da sich eine Kraftvariation des Benutzers direkt auf das Ergebnis der Kontaktkraftschätzung auswirkt. Dieses Problem kann beispielsweise durch eine Anpassung des Bedienkonzeptes gelöst werden, damit die Tischplatte nicht während der gesamten Fahrt gedrückt werden muss. Diese umfassenden Untersuchungen müssen vom Auftraggeber durchgeführt werden, da sie über das eigentliche Ziel der Diplomarbeit hinausführen.

Im Bezug auf das direkte Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkraft, das auf der Motorstrommessung aufbaut, können einige zukünftige Entwicklungen die Qualität dieser Möglichkeit zur Kollisionserkennung steigern. Hierbei geht es vornehmlich um das Ausschalten jener Störquellen, die den Signalverlauf der aus dem Motorstrom berechneten Gewichtsbelastung der Tischbeine beeinflussen. Die Wahl einer niedrigen Schwelle und schnellen Ansprechzeit für die Kollisionsdetektion wird durch schwingende Signale während der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit erschwert. Diese Signalverläufe werden in erster Linie durch die mechanischen Bremsen, die in den Lineareinheiten integriert sind, und durch die Eigenschaften des Reglers, der für das synchrone Verstellen der Antriebe verantwortlich ist, hervorgerufen. Somit ist ein möglicher Ansatz die Verbesserung des Reglers in einer zukünftigen Steuerungsgeneration. Andererseits wird nicht in allen am Markt eingesetzten Hubeinrichtungen eine mechanische Bremse eingesetzt, daher wird dem Auftraggeber empfohlen, das vorgeschlagene Verfahren mit diesen Antrieben zu untersuchen. Für Linearantriebe, deren Motorstromaufnahme im stationären Fall konstant ist und mit einer ausgeprägten Änderung im Quetschfall reagiert, ist auch eine höhere Empfindlichkeit, verglichen mit den verwendeten Antrieben bei der Kollisionsdetektion möglich. Ein weiteres Problem des vorgestellten Verfahrens ist die Kalibrierung des Zusammenhangs zwischen Motorstrom und Beladung der Tischbeine. Dazu muss eine Möglichkeit gefunden werden, um das Ermitteln der Parameter in der Massenproduktion von Steuergeräten und Antrieben so einfach wie möglich zu gestalten. Die Tests der Antriebe bei der Endmontage der Tische werden jedoch immer mehr automatisiert, eine vereinfachte Kalibrierung des Zusammenhangs kann beispielsweise in die Produktionstests integriert werden.

Neben den untersuchten Verfahren ergeben sich aus der Erhebung des Standes der Technik weitere Möglichkeiten zur Kollisionserkennung, die aus unterschiedlichen Gründen im Rahmen der Diplomarbeit nicht weiter untersucht werden, dem Auftraggeber jedoch trotzdem zur genaueren Analyse bei der Entwicklung neuer Produkte vorgeschlagen werden können. So kann beispielsweise eine Drehmomentmessung auf Modellbasis in Betracht gezogen werden, wie sie bereits für die Kollisionserkennung für elektrische Fensterheber im Automobilbereich eingesetzt wird. Das bedeutet aber, dass der Kollisionsschutz direkt bei der Entwicklung einer neuen Reglergeneration berücksichtigt werden muss, ein entsprechender Beobachter für Laständerungen ist direkt im Reglerentwurf einzuplanen. Im Rahmen der Diplomarbeit wird dieser Ansatz zur Kollisionserkennung nicht verfolgt, da sich dieser tiefgreifende Eingriff in die Regelung mit den vorgegebenen Zielen des Auftraggebers nicht vereinbaren lässt.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Logicdata Electronic & Software Entwicklungs GmbH, "Spezifikation DMS-SWD," Deutschlandsberg, 2008.
- [2] Logicdata Electronic & Software Entwicklungs GmbH, "User Manual ACS-CB-SENS," Deutschlandsberg, 2011.
- [3] LINAK, "Adjustable Article of Furniture," Patent No. WO2009/146709 A2, 10.12.2009.
- [4] Hye-Jin Lee, Taw-Sung Yoon, Won-Sang Ra, and Jin-Bae Park, "Practical Pinch Detection Algorithm for Low Cost Anti-Pinch Window Control System," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hong Kong, 2005, pp. 995-1000.
- [5] Hye-Jin Lee, Taw-Sung Yoon, Won-Sang Ra, and Jin-Bae Park, "Robust Pinch Estimation and Detection Algorithm for Low Cost Anti-Pinch Window Control Systems," in *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Raleigh, NC, USA, 2005, pp. 269-274.
- [6] LINAK, "Elektrisch höhenverstellbarer Tisch," Patent DE 20 2007 006 673 U2 2007.10.18, 18.10.2007.
- [7] Product Innovation Project Team, "Final Report," Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung, TU Graz, 2009.
- [8] EMT, *Elektrische Messtechnik 1 - Skriptum*. TU Graz, 2005.
- [9] G.N. Bakalidis, E. Glavas, N.G. Voglis, and Ph. Tsalides, "A Low-Cost Fibre Optic Force Sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 45 No. 1*, pp. 328-331, 1996.
- [10] Zhaoxia Xie and Henry F. Taylor, "A Fibre Optic Binary Switch for Aircraft Application," in *IEEE Sarnoff-Symposium*, Princeton, NJ, USA, 2006, pp. 1-3.
- [11] Qiushi Han and Chen Chen, "Research on Tilt Sensor Technology," in *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, Wuhan, China, 2008, pp. 786-789.
- [12] Sergiusz Luczak and Waldemar Oleksiuk, "Sensing Tilt With MEMS Accelerometers," *IEEE Sensors Journal Vol. 6 No. 6*, pp. 1669-1675, 2006.

- [13] Hrant Henri Djambazian, Chahe Nerguizian, and Maarouf Saad, "3D Inclinometer and MEMS Acceleration Sensors," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, Quebec, Canada, 2006, pp. 3338-3342.
- [14] Hrvoje Džapo, Stare Zoran, and Bobanac Nenad, "Digital Measuring System for Monitoring Motor Shaft Parameters on Ships," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 58 No. 10*, pp. 3702-3712, 2009.
- [15] D. Petreus, C. Farcas, P. Dobra, and D. Moga, "Torque Measurement System Design," in *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, Romania, 2008, pp. 174-177.
- [16] J.D. Turner, "Development of a Rotating-Shaft Torque Sensor for Automotive Applications," *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications Vol. 135 No. 5*, pp. 334-338, 1988.
- [17] Reinoud F. Wolffenbuttel and Jens A. Foerster, "Noncontact Capacitive Torque Sensor For Use on a Rotating Axle," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Vol. 39 No. 6*, pp. 1008-1013, 1990.
- [18] H. Ruser, U. Tröltzsch, M. Horn, and H.-R. Tränkler, "Magnetische Drehmomentmessung mit Low-Cost Sensor," in *VDE/GMA Fachtagung Sensoren und Mess-Systeme*, Ludwigsburg, Germany, 2002, pp. 37-40.
- [19] ME-Meßsysteme GmbH. (18. April 2011) [Online]. <http://www.me-systeme.de/dmsgrund.html>
- [20] Dongguan South China Sea Electronic Co. Ltd. (25. April 2011) [Online]. http://www.chinesesensor.com/S_type_Load_Cell_CZL302-16.html
- [21] Micro-Epsilon, "Betriebsanleitung optoNCDT 1402," Ortenburg (DE),.