

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Masterthesis

René Schellbach

Entwicklung und Aufbau eines Röntgensystems  
zur Überprüfung von Rundschweißnähten an  
Rohren unterschiedlicher Durchmesser mit Hilfe  
einer Time Delay Integration Kamera

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and  
Electrical Engineering*

René Schellbach

Entwicklung und Aufbau eines Röntgensystems  
zur Überprüfung von Rundschweißnähten an  
Rohren unterschiedlicher Durchmesser mit Hilfe  
einer Time Delay Integration Kamera

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung  
im Masterstudiengang Automatisierung  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulfert Meiners  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Röther  
Abgegeben am 18. April 2018

**René Schellbach**

**Thema der Masterthesis**

Entwicklung und Aufbau eines Röntgensystems zur Überprüfung von Rundschweißnähten an Rohren unterschiedlicher Durchmesser mit Hilfe einer Time Delay Integration Kamera

**Stichworte**

Röntgensystem, Rundschweißnaht, Time Delay Integration Kamera, Röntgennormen, Teststand, LabVIEW, Steuerungsprogramm

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines Röntgensystems zur Überprüfung von Rundschweißnähten an Rohren. Zur Aufnahme der Röntgenbilder wird eine Time Delay Integration Kamera genutzt, die im Rahmen eines Teststands analysiert wird. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Teststand wird das Röntgensystem – unter Berücksichtigung der geltenden Röntgennormen – mit seinen elektrischen, mechanischen und programmtechnischen Komponenten konzeptioniert und aufgebaut. Mit der Entwicklungsumgebung LabVIEW wird ein Steuerungsprogramm entwickelt, das das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Röntgensystems ermöglicht.

**René Schellbach**

**Title of the paper**

Development and construction of an X-ray system to inspect round welds on pipes of different diameters by utilizing a Time Delay Integration camera

**Keywords**

X-ray system, round weld, Time Delay Integration camera, X-ray standards, test stand, LabVIEW, control program

**Abstract**

This thesis deals with the development and construction of an X-ray system inspecting round welds on pipes. A Time Delay Integration camera is used to record X-ray images, which are analyzed as part of a test stand. Based on the findings from the test stand, the X-ray system is designed and constructed with its electrical, mechanical and programmatical components considering valid X-ray standards. With the LabVIEW development environment, a control program is created enabling the interaction of the X-ray system's individual components.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an Prof. Dr.-Ing. Ulfert Meiners aussprechen, der mir durch seine Betreuung seitens der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und seine Rolle als Prüfer die Möglichkeit gab, diese Arbeit anzufertigen. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr.-Ing. Michael Röther, der meine Arbeit als Zweitkorrektor bewertet hat.

Außerdem möchte ich besonders meiner Familie danken, ohne deren Unterstützung mir dieses Studium nicht möglich gewesen wäre.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	I
Tabellenverzeichnis .....	IV
Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen .....	V
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Beschreibung der VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH .....	2
1.3 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2 Grundlagen der Röntgentechnik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Definition der Röntgenstrahlung.....	5
2.2 Prinzip der Röntgenprüfung .....	5
2.3 Arten von Röntgendetektoren .....	7
<b>3 Analyse der TDI-Kamera anhand eines Teststands.....</b>	<b>12</b>
3.1 Aufbau des Teststands .....	12
3.1.1 Gesamtaufbau des Teststands.....	12
3.1.2 Prüfobjekt.....	13
3.1.3 Antrieb der Linearführung.....	15
3.1.4 Messrad-Encoder zur Synchronisierung der Bildaufnahmen .....	16
3.1.5 TDI-Kamera .....	18
3.1.6 Testprogramm.....	22
3.2 Durchführung und Evaluierung der Testaufnahmen.....	29
3.2.1 Auswirkung der geometrischen Vergrößerung .....	29
3.2.2 Pixelfehler .....	33
3.2.3 Störeinflüsse .....	34
3.2.4 Aufnahmegeschwindigkeit der TDI-Kamera .....	36
<b>4 Konzeptionierung und Umsetzung des Röntgensystems.....</b>	<b>37</b>
4.1 Gesamtaufbau des Röntgensystems .....	37
4.2 Mechanische Konzeptionierung und Umsetzung .....	38
4.2.1 Bogenführung .....	38
4.2.2 Befestigung und Ausrichtung der Bogenführung .....	41
4.3 Elektrische Konzeptionierung und Umsetzung.....	43
4.3.1 Antriebsauslegung .....	43
4.3.2 Synchronisierung der TDI-Kamera .....	55
4.3.3 Schaltschrank .....	64
4.3.4 Schnittstellenauslegung .....	66
4.4 Programmtechnische Konzeptionierung und Umsetzung.....	68
4.4.1 Bedienoberfläche .....	68
4.4.2 Steuerungsprogramm .....	74
<b>5 Auswertung des Röntgensystems.....</b>	<b>83</b>
5.1 Bildqualität.....	83

5.2	Fahrverhalten des Führungswagens.....	88
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>94</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>XV</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Beispielhafte Darstellung einer Rohrleitung an Land .....	1
Abbildung 1.2: Ziele der Röntgenprüfung von Schweißnähten .....	1
Abbildung 1.3: Geschäftsfelder der VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH .....	2
Abbildung 1.4: Zielsetzung der Arbeit .....	3
Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit .....	4
Abbildung 2.1: Aufbau einer Röntgenröhre .....	5
Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Röntgensystems.....	6
Abbildung 2.3: Abbildungsgeometrie an einem punktförmigen Brennfleck .....	6
Abbildung 2.4: Abbildungsgeometrie an einem endlichen Brennfleck .....	7
Abbildung 2.5: Arten der Umwandlung von Röntgenstrahlung .....	8
Abbildung 2.6: Vorgänge der Röntgenfilmverarbeitung .....	8
Abbildung 2.7: Aufnahme von bewegten Prüfobjekten mit der TDI-Kamera .....	10
Abbildung 2.8: Funktionsprinzip der TDI-Kamera mit vier Zeilen.....	11
Abbildung 3.1: Anordnung der Komponenten im Teststand .....	13
Abbildung 3.2: Fotoaufnahme des Doppeldraht-BPKs für den Teststand.....	13
Abbildung 3.3: Röntgenbild des Doppeldraht-BPKs mit Anwendung der Profilfunktion ....	14
Abbildung 3.4: Histogramm der Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPKs.....	14
Abbildung 3.5: Beispielhafte Darstellung eines eingerichteten Fahrprofils in NanoPro .....	15
Abbildung 3.6: Taktsignale zur Ansteuerung der Zeilenbilder.....	17
Abbildung 3.7: Einstellbare Kameraparameter in der Software X88 .....	18
Abbildung 3.8: Unkalibrierte Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPK (Rohbild).....	20
Abbildung 3.9: Offsetbild einer Röntgenaufnahme .....	20
Abbildung 3.10: Gainbild einer Röntgenaufnahme .....	21
Abbildung 3.11: Kalibrierte Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPKs .....	21
Abbildung 3.12: Einbindung der Herstellerdateien in das Testprogramm .....	23
Abbildung 3.13: Programmablauf im Testprogramm (Teil 1) .....	24
Abbildung 3.14: Programmablauf im Testprogramm (Teil 2) .....	25
Abbildung 3.15: Manuelle Eintragung des Pfades für die Settingdatei .....	26
Abbildung 3.16: Auswahlfenster zum Verbindungsaufbau zur TDI-Kamera .....	26
Abbildung 3.17: Konfigurationsmenü zur manuellen Änderung von Kameraparametern ..	27
Abbildung 3.18: Programmausschnitt zur Anpassung der Kameraparameter .....	27
Abbildung 3.19: Switch-Anweisung zur Abfrage unterschiedlicher Programmfälle .....	28
Abbildung 3.20: Testaufbau mit unterschiedlichen Vergrößerungen V .....	29
Abbildung 3.21: Einfluss der Vergrößerung auf unterschiedliche Vergrößerungen.....	30
Abbildung 3.22: Fehlerhafte Bildinformationen einer Röntgenaufnahme .....	33
Abbildung 3.23: Schematische Darstellung zur Erläuterung eines Cluster-Kernel-Pixels .	34
Abbildung 3.24: Pixelstörungen ohne Bleimantel bei verschiedenen Spannungen.....	34
Abbildung 3.25: Bleiummantelung der TDI-Kamera .....	35
Abbildung 3.26: Pixelstörungen mit Bleimantel bei verschiedenen Spannungen.....	35

Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Röntgensystems.....	37
Abbildung 4.2: Aufgebautes Röntgensystem in der Strahlenschutzkabine.....	38
Abbildung 4.3: Anpassung der Teleskopschienenlänge an den Rohrdurchmesser .....	39
Abbildung 4.4: Bewegung des Führungswagens auf der Bogenführung .....	40
Abbildung 4.5: Positionierung der TDI-Kamera mit Hilfe der Verstelleinheit .....	41
Abbildung 4.6: Öffnung der Bogenführung .....	41
Abbildung 4.7: Unterseite der Bogenführung zur Darstellung der Schnellverschlüsse.....	42
Abbildung 4.8: Oberseite der Bogenführung zur Darstellung der Scharniere .....	42
Abbildung 4.9: Anordnung der vier Klemmblocke an der Bogenführung.....	42
Abbildung 4.10: Ablauf der Antriebsauslegung.....	43
Abbildung 4.11: Darstellung der Bauteile an dem Führungswagen .....	44
Abbildung 4.12: Einwirkende Kräfte auf den Führungswagen .....	45
Abbildung 4.13: Auf den Führungswagen einwirkende Kräfte .....	46
Abbildung 4.14: Benötigte Drehmomente für den Führungswagen (Abtriebsseite).....	48
Abbildung 4.15: Schrittmotor ST6018D4508-B.....	50
Abbildung 4.16: Drehmoment des Schrittmotors in Abhängigkeit der Drehzahl.....	50
Abbildung 4.17: Umwandlung der translatorischen zur rotatorischen Bewegung .....	51
Abbildung 4.18: Planetengetriebe .....	52
Abbildung 4.19: Sicherheitsbremse.....	52
Abbildung 4.20: 3-Kanal-Encoder .....	52
Abbildung 4.21: Benötigte Drehmomente für den Schrittmotor (Antriebsseite).....	54
Abbildung 4.22: Schrittmotorsteuerung <i>SMC/47-S</i> .....	54
Abbildung 4.23: Metallschraube als Referenzposition .....	55
Abbildung 4.24: Inkremental-Encoder am Führungswagen.....	56
Abbildung 4.25: Wegstrecke der TDI-Kamera in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers ...	56
Abbildung 4.26: Prozess zum Ein-/Austritt in/aus dem Programmiermodus .....	59
Abbildung 4.27: Kommunikation zwischen Anwendercomputer und Encoder.....	60
Abbildung 4.28: Programmablauf zum Eintritt in den Programmiermodus.....	61
Abbildung 4.29: Programmablauf zum Setzen der Auflösung .....	62
Abbildung 4.30: Programmablauf zum Auslesen der Auflösung.....	63
Abbildung 4.31: Programmablauf zum Austritt aus dem Programmiermodus.....	64
Abbildung 4.32: Komponenten des Schaltschranks .....	65
Abbildung 4.33: Aufgebauter Schaltschrank .....	65
Abbildung 4.34: Kontrollbereichsgrenze vom Anwendercomputer zum Röntgensystem ..	66
Abbildung 4.35: Ermittlung der Kontrollbereichsgrenze.....	67
Abbildung 4.36: Bedienoberfläche zur Steuerung des Röntgensystems .....	68
Abbildung 4.37: Programmablauf zur Bedienung des Röntgensystems .....	69
Abbildung 4.38: Bedienoberfläche zur Auswahl der Ports für die seriellen Schnittstellen .	70
Abbildung 4.39: Bedienoberfläche zur Anpassung der Auflösung im Encoder .....	71
Abbildung 4.40: Bedienoberfläche zur manuellen Steuerung des Führungswagens .....	72
Abbildung 4.41: Fortschrittsanzeige der Röntgenaufnahme .....	73

Abbildung 4.42: Bedienoberfläche zur Darstellung des unkalibrierten Röntgenbildes .....	73
Abbildung 4.43: Bedienoberfläche zur Kalibrierung des Röntgenbildes .....	74
Abbildung 4.44: Integrierte Komponenten des Steuerungsprogramms <i>Pipeinspection.vi</i> .....	75
Abbildung 4.45: Verbindungsaufbau der seriellen Schnittstellen .....	75
Abbildung 4.46: Auszug des Steuerungsprogramms zum Ein-/Austritt in/aus dem Programmiermodus .....	76
Abbildung 4.47: Auszug des Steuerungsprogramms zum Setzen der Auflösung .....	76
Abbildung 4.48: Auszug des Steuerungsprogramms zum Auslesen der Auflösung.....	77
Abbildung 4.49: Auszug des Steuerungsprogramms zur Ansteuerung des Schrittmotors	78
Abbildung 4.50: Funktion <i>fkt_acquire</i> der eigens entwickelten <i>Pipeinspection.dll</i> .....	79
Abbildung 4.51: Funktion <i>fkt_record</i> der eigens entwickelten <i>Pipeinspection.dll</i> .....	80
Abbildung 4.52: Ablauf des Steuerungsprogramms während einer Röntgenaufnahme ....	81
Abbildung 5.1: Röntgenaufnahme bei Prüfzenario D mit $v_{\text{TDI-Kamera}} = 11,12 \text{ cm/min}$ .....	86
Abbildung 5.2: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei $v_{\text{TDI-Kamera}} = 11,12 \text{ cm/min}$ .....	86
Abbildung 5.3: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei $v_{\text{TDI-Kamera}} = 22,25 \text{ cm/min}$ .....	87
Abbildung 5.4: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei $v_{\text{TDI-Kamera}} = 44,5 \text{ cm/min}$ .....	88
Abbildung 5.5: Führungswagen in horizontaler Lage auf der Bogenführung .....	90
Abbildung 5.6: Führungswagen in vertikaler Lage auf der Bogenführung.....	90
Abbildung 5.7: Fahrverhalten des Motors mit $n_{\text{Motor}} = 5 \text{ U/min}$ in horizontaler Lage .....	90
Abbildung 5.8: Fahrverhalten des Motors mit $n_{\text{Motor}} = 5 \text{ U/min}$ in vertikaler Lage .....	91
Abbildung 5.9: Fahrverhalten des Motors mit $n_{\text{Motor}} = 20 \text{ U/min}$ in horizontaler Lage .....	92
Abbildung 5.10: Fahrverhalten des Motors mit $n_{\text{Motor}} = 20 \text{ U/min}$ in vertikaler Lage .....	92

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3.1: Berechnete effektive Encoderauflösungen .....	17
Tabelle 3.2: Übersicht der wichtigsten Einstellparameter der TDI-Kamera.....	18
Tabelle 4.1: Aufteilung der Rohrdurchmesser auf drei Bogenführungen .....	40
Tabelle 4.2: Gewichte der Bauteile auf dem Führungswagen .....	44
Tabelle 4.3: Tatsächliche Gewichte des Antriebssystems .....	53
Tabelle 4.4: Spannungsniveaus der elektrischen Komponenten des Röntgensystems ....	64
Tabelle 5.1: Äquivalente Darstellung der Basis-Ortsauflösung zum BPK-Wert .....	84
Tabelle 5.2: Umrechnung der Geschwindigkeiten .....	85
Tabelle 5.3: Eingestellte Prüfparameter zur Aufnahme von Röntgenbildern.....	85

## Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

### A) Formelzeichen

$d$	Mittlerer Zahnradradius
$d_{\text{Bereich}}$	Größenbereich der zu prüfenden Rohrdurchmesser
$d_{\text{Bogenführung}}$	Durchmesser der Bogenführung
$d_{\text{Encoder}}$	Durchmesser des Encoderzahnades
$d_f$	Brennfleckgröße
$d_M$	Werkstoffdicke des zu prüfenden Materials
$d_{\text{Rohr}}$	Durchmesser des Rohres
$f_{\text{benötigt}}$	Benötigte Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera
$F_H$	Hangabtriebskraft
$f_{\text{Linerate}}$	Aufnahmefrequenz der Zeilen
$f_{\text{Linerate\_max}}$	Maximale Aufnahmefrequenz der Zeilen
$F_N$	Normalkraft
$F_R$	Rollreibungskraft
$f_{\text{verwendet}}$	Verwendete Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera
$g_\mu$	Mittlerer Grauwert des Bildes
$\dot{H}$	Strahlenintensität hinter dem Prüfobjekt
$\dot{H}_0$	Ungeschwächte Strahlenintensität der Röntgenröhre
$I$	Stromstärke der Röntgenröhre
$J_G$	Trägheitsmoment des Getriebes
$J_L$	Trägheitsmoment der linear bewegten Masse
$J_M$	Trägheitsmoment des Motors
$l_{\text{Teleskopschiene}}$	Länge der Teleskopschiene
$l_{\text{Teleskopschiene}}(n_{\text{Bogenführung}})$	Länge der Teleskopschiene in Abhängigkeit der Anzahl an Bogenführungen
$M_{\text{Abtrieb}}$	Drehmoment der Abtriebsseite
$M_{\text{Antrieb}}$	Drehmoment der Antriebsseite
$M_{\text{Beschleunigung}}$	Drehmoment während der Beschleunigung
$m_{\text{Führungswagen}}$	Masse des Führungswagens
$M_{\text{gleichförmigeBewegung}}$	Drehmoment während der gleichförmigen Bewegung
$M_L$	Drehmoment der linear bewegten Masse
$M_{M\_Beschleunigung}$	Auf Antriebsseite umgerechnetes Drehmoment während der Beschleunigung
$M_{M\_gleichförmige\_Bewegung}$	Auf Antriebsseite umgerechnetes Drehmoment während der gleichförmigen Bewegung
$M_{M\_Stillstand}$	Auf Antriebsseite umgerechnetes Drehmoment während des Stillstandes
$M_{M\_Verzögerung}$	Auf Antriebsseite umgerechnetes Drehmoment während der

	Verzögerung
$M_{\text{Stillstand}}$	Drehmoment während des Stillstandes
$M_{\text{Verzögerung}}$	Drehmoment während der Verzögerung
$n_{\text{Bogenführung}}$	Anzahl an benötigten Bogenführungen
$n_L$	Rotatorische Drehgeschwindigkeit des Zahnrades
$n_{\text{Motor}}$	Drehzahl des Schrittmotors
$N_{\text{Motorwelle}}$	Anzahl der Umdrehungen von der Motorwelle
$p_{\text{Breite}}$	Pixelbreite
$P_{\text{PosEnc}}$	Kameraparameter <i>Position Encoder</i>
$R_{\text{effektiv}}$	Effektive Auflösung
$R_{\text{Encoder}}$	Encoderauflösung
$R_{\text{optimal}}$	Optimale Auflösung
$r_{\text{Zahnrad}}$	Radius des Zahnrades
$S_{\text{Abstand}}$	Abstand zwischen Rohr und TDI-Kamera
$S_{\text{Fahrprofil}}$	Zurückgelegte Strecke des Führungswagens beim genutzten Fahrprofil
$SR_{\text{b\_Image}}$	Basis-Ortsauflösung des digitalen Bildes
$S_{\text{TDI-Kamera}}$	Zurückgelegte Strecke der TDI-Kamera
$t_{\text{benötigt}}$	Benötigte Aufnahmezeit der TDI-Kamera
$U_{\text{Encoder}}$	Umfang des Encodermessrades
$U_g$	Geometrische Unschärfe
$\ddot{u}_G$	Getriebeübersetzung
$U_{\text{Zahnrad}}$	Zahnradumfang
$V$	Geometrische Vergrößerung
$v$	Geschwindigkeit
$V_{\text{Führungswagen}}$	Geschwindigkeit des Führungswagens
$VI$	Virtuelles Instrument
$V_L$	Lineare Vortriebsgeschwindigkeit des Führungswagens
$V_{\text{Objekt}}$	Objektgeschwindigkeit
$V_{\text{TDI-Kamera}}$	Kamerageschwindigkeit
$V_{\text{TDI-Kamera\_max}}$	Maximale Kamerageschwindigkeit
$\alpha$	Steigungswinkel des Führungswagens auf der Bogenführung
$\Delta t$	Zeitdifferenz
$\Delta V_L$	Geschwindigkeitsdifferenz der linear bewegten Masse
$\eta_G$	Wirkungsgrad des Getriebes
$\mu$	Schwächungskoeffizient des Werkstoffes
$\mu_{\text{Reib}}$	Reibkoeffizient
$\sigma$	Standardabweichung des Rauschens
$\varphi_{\text{Encoder}}$	Kreisbogen des Encoders
$\varphi_{\text{TDI-Kamera}}$	Kreisbogen der TDI-Kamera

## B) Abkürzungen

AC	Wechselspannung (engl.: alternating current)
BPK	Bildprüfkörper
CKP	Cluster-Kernel-Pixel
DC	Gleichspannung (engl.: direct current)
DLL	dynamische Programmbibliothek (engl.: dynamic link library)
EEPROM	nichtflüchtiger, elektronischer Speicherbaustein (engl.: electrically erasable and programmable read only memory)
ESD	Elektrostatische Entladung (engl.: electrostatic discharge)
FDA	Fokus-Detektor-Abstand
FOA	Fokus-Objekt-Abstand
GigE	Gigabit-Ethernet
LED	Leuchtdiode (engl.: light-emitting diode)
SMD	Bauelement für Oberflächenbestückung (engl.: Surface Mounted Device)
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-to-noise-ratio)
SNR <sub>N</sub>	Normiertes Signal-Rausch-Verhältnis
TDI	Zeitverzögerte Integration (engl.: Time Delay Integration)
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Serielles Bussystem (engl.: Universal Serial Bus)

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

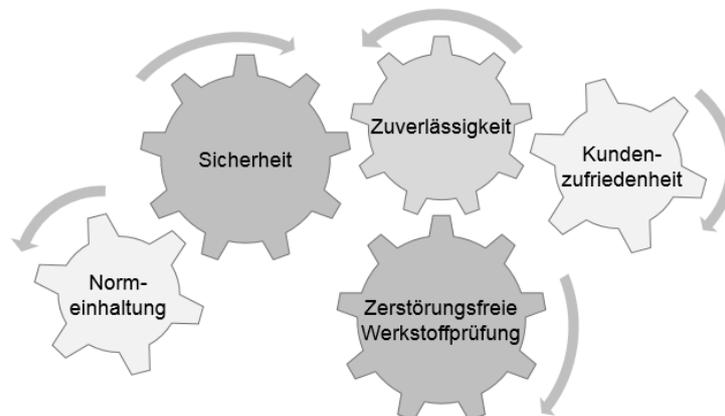
Rohrleitungen werden überall dort eingesetzt, wo große Mengen an flüssigen und gasförmigen Stoffen über weite Entfernungen transportiert werden. Dabei sind die einzelnen Rohre über Schweißnähte miteinander verbunden. Es muss sichergestellt werden, dass die Schweißnähte der Rohre (siehe Abbildung 1.1) halten und keine Stoffe austreten. Zur Einhaltung der Zuverlässigkeit dieses Transportmittels ist die Sicherung der Schweißnahtqualität der Rohre essentiell. Die Schweißnähte der Rohre müssen auf verborgene innere Unregelmäßigkeiten und Lufteinschlüsse millimetergenau geprüft werden.



**Abbildung 1.1: Beispielhafte Darstellung einer Rohrleitung an Land [32]**

Zur Prüfung können unterschiedliche Methoden verwendet werden. Neben der Ultraschall-Prüfung ist die Röntgenprüfung das am häufigsten angewendete Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [15, S. 3]. Diese Art der Prüfung liefert reproduzierbare und nachvollziehbare Prüfergebnisse und macht die Röntgenprüfung somit zuverlässig. Die Anforderungen sowie die Vorgehensweise einer solchen Materialprüfung werden in der Norm ISO 17636 beschrieben und gelten für die digitale Durchstrahlungsprüfung von Schmelzschweißverbindungen in metallischen Werkstoffen [11, S. 6].

Zur Prüfung der Schweißnahtverbindungen werden Röntgensysteme nach Kundenwünschen entwickelt. Nutzer dieser Röntgensysteme sind unter anderem Bauunternehmen, die eine hohe Leistungsfähigkeit der Röntgensysteme und ihren Prüfergebnissen erwarten. Die ineinandergreifenden Ziele der Röntgenprüfung von Schweißnähten sind in Abbildung 1.2 aufgezeigt.



**Abbildung 1.2: Ziele der Röntgenprüfung von Schweißnähten**

Der Einsatz aktueller Röntgensystem zur Schweißnahtprüfung basiert häufig auf analogen Röntgenfilmen oder digitalen Flächendetektoren. Diese Arten der Röntgenaufnahme haben den Nachteil, dass größere Objekte nicht auf einem einzelnen Röntgenbild dargestellt werden können. Aus diesem Grund müssen mehrere Einzelbilder aufgenommen werden, die im Anschluss daran zusammengefügt werden müssen, wodurch ein zusätzlicher Arbeitsschritt entsteht. Diesen Nachteil soll der Einsatz einer TDI-Kamera kompensieren. Mit der TDI-Kamera findet die Bildaufnahme des Prüfobjekts zeilenweise statt, wodurch ein einziges Röntgenbild – unabhängig von der Länge des Prüfobjekts – entsteht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Röntgensystem entwickelt werden, das die TDI-Kamera zur Durchstrahlungsprüfung von Rundschweißnähten nutzt. Um dem Anwender die Durchführung einer Röntgenprüfung zu erleichtern, soll das Röntgensystem weitgehend automatisiert werden. Das Röntgensystem soll auch auf einer digitalen Durchstrahlungsprüfung basieren, sodass die Röntgenaufnahme direkt als digitales Bild auf dem Anwendermonitor beurteilt werden kann. Bei der Entwicklung eines solchen Röntgensystems müssen die geltenden Normen berücksichtigt werden.

## 1.2 Beschreibung der VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH

Das im Jahr 1996 gegründete Unternehmen VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH ist heute ein mittelständiges Unternehmen mit über 50 Mitarbeitern. Zu den Kernkompetenzen des Unternehmens zählen die Entwicklung und Herstellung von individualisierten sowie standardisierten Röntgenanlagen für die Fertigungstechnik, Sicherheitstechnik sowie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (siehe Abbildung 1.3).

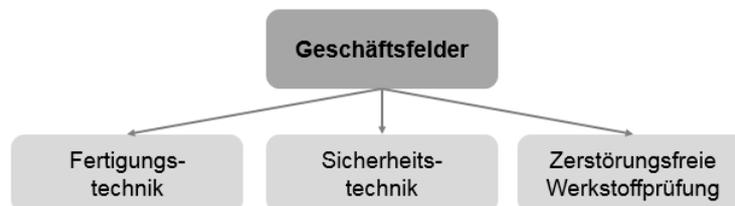


Abbildung 1.3: Geschäftsfelder der VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH

In der Fertigungstechnik werden Röntgensysteme zur automatisierten Zählung von SMD-Bauteilen eingesetzt. Diese Bauteile befinden sich auf sogenannten Reels, die mit Röntgenstrahlen durchstrahlt und durch eine eigens entwickelte Software detektiert und gezählt werden. Das kontaktlose Arbeitsprinzip hat den Vorteil, innerhalb kurzer Zeit und ohne dem Öffnen der ESD-Folie die Bauteile zählen zu können.

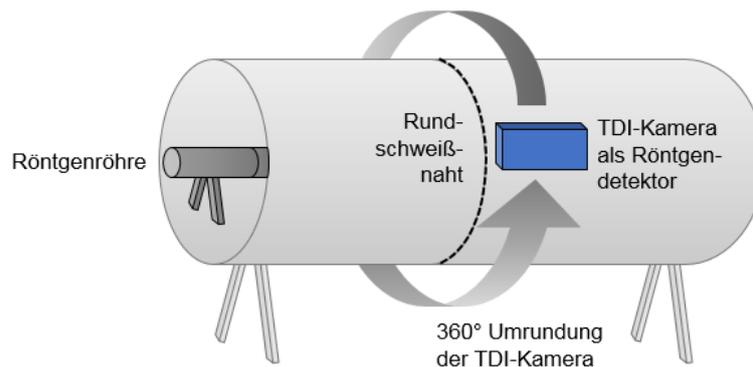
In dem Geschäftsfeld der Sicherheitstechnik werden mobile Röntgensysteme eingesetzt. Diese werden ausschließlich von der Polizei und dem Militär genutzt und dienen zur Detektion von Bomben und zur Überprüfung von verdächtigen Objekten.

Für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung werden häufig standardisierte stationäre Röntgenkabinen verschiedener Größen genutzt, mit denen die Werkstücke auf Qualitätsmängel geprüft werden. Jedoch werden auch Röntgensysteme nach Kundenwünschen

konzipiert und entwickelt. Bei den Systemen handelt es sich oft um Prototypen; diese benötigen eine genaue Planung und Projektierung. Diese Art des Sondermaschinenbaus macht es dem Unternehmen möglich, sich von andere Unternehmen, die nur Standardlösungen anbieten, abzugrenzen.

### 1.3 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit entstand aus dem Wunsch des Unternehmens VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH ein Röntgensystem zur Überprüfung von Rundschweißnähten an Rohren zu entwickeln und aufzubauen. Für die Aufnahme der Röntgenbilder soll eine sogenannte Time Delay Integration Kamera (kurz: TDI-Kamera) eingesetzt werden, die um die zu prüfende Schweißnaht bewegt werden muss (siehe Abbildung 1.4). Erfahrungen mit dieser Kamera konnte das Unternehmen bislang nicht sammeln. Im Rahmen dieser Arbeit muss die Kamera auf ihre Nutzbarkeit sowie Grenzen und Defizite getestet werden. Anhand dieser Erkenntnisse soll im Anschluss ein Röntgensystem unter Einsatz der TDI-Kamera entwickelt und aufgebaut werden. Anschließend soll dieses Röntgensystem bewertet werden.



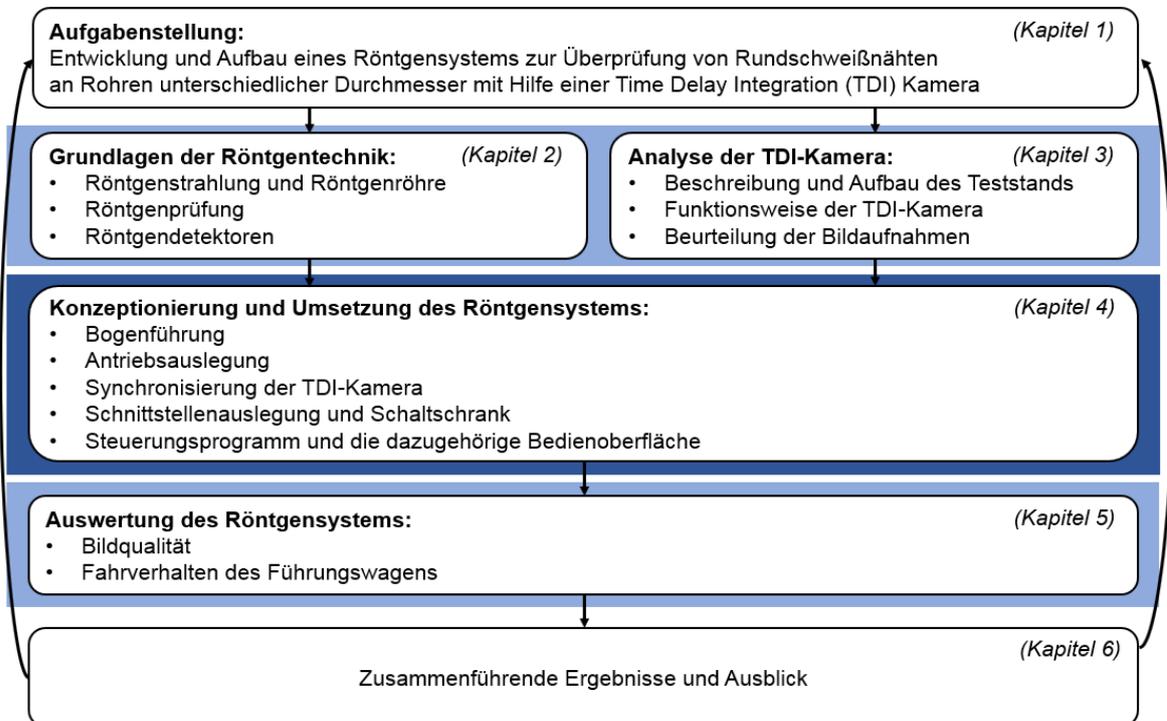
**Abbildung 1.4: Zielsetzung der Arbeit**

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel (siehe Abbildung 1.5), wobei die Kapitel 3 und 4 den inhaltlichen Kern der Arbeit ausmachen.

Das *Kapitel 1* beinhaltet die Motivation, Aufgabenstellung und die Ziele der hier bearbeitenden Masterarbeit. Im *Kapitel 2* werden zum Verständnis der Aufgabenstellung die Grundlagen der Röntgentechnik beschrieben. Dazu gehören Erklärungen zur Funktionsweise der Röntgenstrahlung und dem Aufbau einer Röntgenröhre. Zusätzlich sind für das Verständnis der Masterarbeit Kenntnisse der Röntgenprüfung notwendig, dem in Kapitel 2.2 Rechnung getragen wird. Zuletzt werden in Kapitel 2.3 die verschiedenen Arten der Röntgendetektoren zur Aufnahme von Röntgenbildern beschrieben.

Das *Kapitel 3* widmet sich der Analyse der TDI-Kamera anhand eines Teststandes. Hierbei werden der Gesamtaufbau sowie die für den Teststand benötigten Komponenten beschrieben. Notwendige Parametrisierungen der TDI-Kamera werden analysiert. Aus dem Teststand können Rückschlüsse für den Aufbau des Röntgensystems gezogen werden.

Dieses Röntgensystem wird mit seinen einzelnen Komponenten in *Kapitel 4* konzipiert und umgesetzt. Dazu wird eine Bogenführung entworfen, die um das zu prüfende Rohr gelegt und befestigt wird. Auf dieser Bogenführung wird die TDI-Kamera mithilfe eines elektrisch angetriebenen Führungswagens bewegt. Zudem muss eine Lösung zur Synchronisierung der Bewegungsgeschwindigkeit des Führungswagens mit der Aufnahme­frequenz der TDI-Kamera entwickelt werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Röntgensystems wird mit Hilfe eines Steuerungsprogramms mit *LabVIEW* umgesetzt. Zusätzlich wird auf Basis des geschriebenen Steuerungsprogramms die Bedienoberfläche für den Anwender entwickelt. Der Auswertung des Röntgensystems widmet sich *Kapitel 5*. Hierbei liegt der Fokus auf der Auswertung der Bildqualität der Röntgenaufnahmen sowie auf dem Fahrverhalten des Führungswagens zur Umfahrung der TDI-Kamera um das zu prüfende Rohr. Mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse sowie einem Ausblick wird die Arbeit in *Kapitel 6* abgeschlossen.



**Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit**

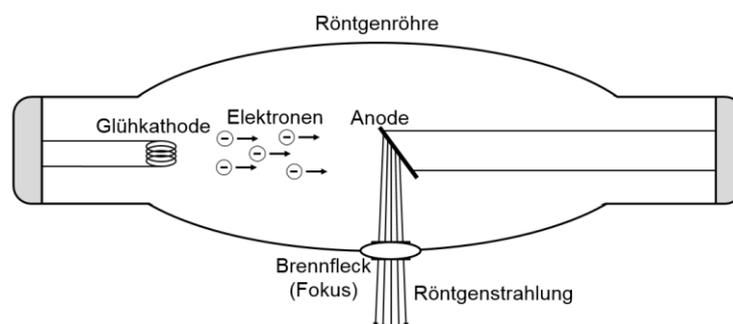
## 2 Grundlagen der Röntgentechnik

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Begrifflichkeiten erläutert, die das notwendige Verständnis für die Röntgenprüfung vermitteln. Fokus liegt hierbei in der Beschreibung der Röntgenprüfung sowie deren Röntgendetektoren.

### 2.1 Definition der Röntgenstrahlung

Die Röntgenstrahlung beruht auf der Entdeckung von Conrad Wilhelm Röntgen im Jahre 1895. Sie wird definiert als elektromagnetische Strahlung großer Durchdringungsfähigkeit, die anders als Licht auch undurchsichtige Stoffe durchdringt. Mit Hilfe dieser Durchstrahlung können verborgene innere Unregelmäßigkeiten, Hohlräume und Einschlüsse sichtbar gemacht werden. [17, S. 3]

Erzeugt wird die Strahlung mit einer Röntgenröhre, deren schematischer Aufbau in Abbildung 2.1 dargestellt ist.



**Abbildung 2.1: Aufbau einer Röntgenröhre** [15, S. 8]

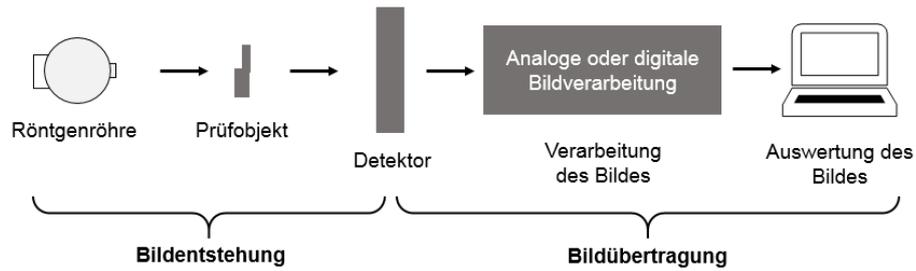
In der Röntgenröhre befindet sich zwischen der positiv geladenen Anode und der negativ geladenen Glühkathode ein elektrisches Feld. Durch das elektrische Feld werden die von der Glühkathode in das Vakuum austretenden Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Sobald die Elektronen auf der Anode auftreffen, entsteht durch die Wechselwirkung mit den Atomen eine Photonenstrahlung, die aus dem Brennfleck (Fokus) der Röhre austreten. Diese Strahlung wird Röntgenstrahlung genannt. [15, S. 8f.][20, S. 25]

### 2.2 Prinzip der Röntgenprüfung

Die Röntgenprüfung, auch Durchstrahlungsprüfung genannt, ist ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung von Materialunterschieden. In diesem Verfahren wird eine Wandlung von einem unsichtbaren Strahlenbild in ein sichtbares und auswertbares Röntgenbild durchgeführt. [15, S. 32]

Diese Wandlung der Röntgenstrahlung in ein Röntgenbild wird durch einen Röntgendetektor (kurz: Detektor) umgesetzt. Die verschiedenen Arten der Röntgendetektoren und deren Funktionsweise werden in Kapitel 2.3 beschrieben.

Der Röntgendetektor ist Teil eines Röntgensystems, dessen schematischer Aufbau in folgenden Abbildung 2.2 dargestellt wird.



**Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau eines Röntgensystems**  
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [17, S. 62])

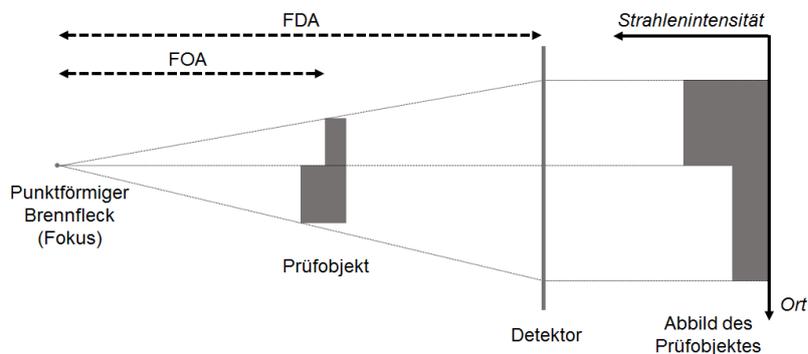
Die Darstellung der Materialunterschiede im Werkstoff basiert auf dem Schwächungsgesetz der Röntgenstrahlung [17, S. 62]. Das Schwächungsgesetz stellt ein Verhältnis zwischen der im Werkstoff eindringenden Strahlung  $\dot{H}_0$  zu der darin austretenden Strahlung  $\dot{H}$  dar. Die Strahlung ist beim Durchdringen des Materials abhängig von der Werkstoffdicke  $d_M$  sowie der Schwächungskonstante  $\mu$  des Werkstoffes. [17, S. 18][18, S. 9f.]

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \cdot e^{-\mu \cdot d_M} \quad (2.1)$$

Zusätzlich zum Schwächungsgesetz muss die geometrische Vergrößerung  $V$  des Prüfobjektes berücksichtigt werden. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der Abstände zwischen Fokus-Detektor (FDA) und Fokus-Objekt (FOA) [17, S. 63].

$$V = \frac{FDA}{FOA} \quad (2.2)$$

Wenn der Abstand vom Brennfleck zum Prüfobjekt genau so groß ist, wie der Abstand zwischen Prüfobjekt und Detektor, stellt sich eine Vergrößerung von  $V = 2$  ein. Dies erzeugt ein doppelt so großes Abbild des Prüfobjektes.

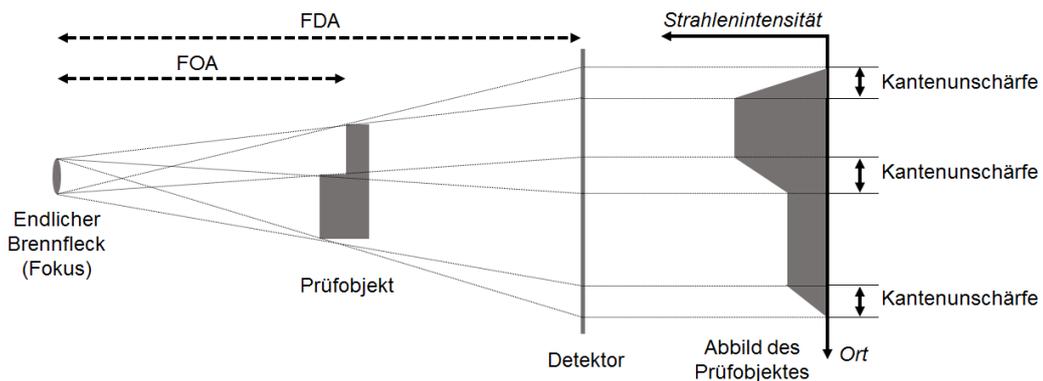


**Abbildung 2.3: Abbildungsgeometrie an einem punktförmigen Brennfleck** [15, S. 51]

Anhand der Abbildung 2.3 werden die Zusammenhänge deutlich. Die aus dem punktförmigen Brennfleck (Fokus) austretende Röntgenstrahlung durchdringt das unterschiedlich

dicke Prüfobjekt und trifft auf den Röntgendetektor. In dem schmalen Bereich des Prüfobjektes werden die Strahlen nicht so stark geschwächt wie in dem breiteren Bereich. Somit fällt eine höhere Strahlenintensität auf den Detektor, wodurch der schmalere Bereich des Prüfobjektes heller erscheint. Im breiteren Bereich des Prüfobjektes wird die Strahlung hingegen stärker geschwächt, sodass die Intensität geringer ist. Die Intensitätssprünge zwischen den Materialdicken sind deutlich erkennbar.

In der Praxis existieren jedoch keine punktförmigen Brennflecke, sondern endliche Brennflecke [17, S. 63]. Die Abbildungsgeometrie an einem endlichen Brennfleck wird in Abbildung 2.4 dargestellt.



**Abbildung 2.4: Abbildungsgeometrie an einem endlichen Brennfleck** [15, S. 51]

Es ist erkennbar, dass die Kanten des Prüfobjektes nur unscharf und nicht als Intensitätssprung abgebildet werden. Grund hierfür ist der endliche Brennfleck und den damit einhergehenden Zwischenintensitäten. Kleine Objektdetails sind nicht mehr erkennbar und können im Röntgenbild nicht mehr nachgewiesen werden. [15, S. 51]

Diese Kantenunschärfe wird als geometrische Unschärfe  $U_g$  bezeichnet und ist von der geometrischen Vergrößerung  $V$  sowie auch der Größe des Brennflecks  $d_f$  abhängig.

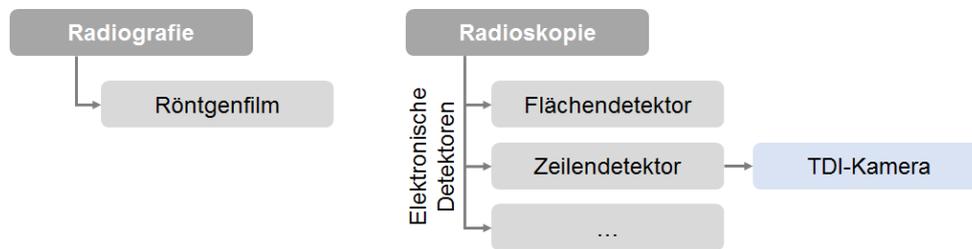
$$U_g = d_f \cdot (V - 1) \quad (2.3)$$

Zur Minimierung der geometrischen Unschärfe muss in der Praxis der Abstand zwischen Prüfobjekt und Detektor so gering wie möglich gehalten und eine Röntgenröhre mit einem möglichst kleinen Brennfleck genutzt werden. [17, S. 63]

### 2.3 Arten von Röntgendetektoren

In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung kommen in Abhängigkeit der erforderlichen Prüfaufgabe verschiedene Arten der Umwandlung der Röntgenstrahlung in ein sichtbares Bild zum Einsatz (siehe Abbildung 2.5). Diese Arten der Umwandlung werden in zwei Bereiche klassifiziert – Radiografie und Radioskopie [15, S. 32]. Die Unterschiede der Bereiche liegen in der Art der Sichtbarmachung des Röntgenschwächungsbildes. In der Radiografie wird als Medium der analoge Röntgenfilm genutzt, wobei in der Radioskopie ein

elektronischer Detektor verwendet wird, der die Röntgenbilder in digitaler Form erzeugt. [17, S. 61]



**Abbildung 2.5: Arten der Umwandlung von Röntgenstrahlung**  
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [17, S. 61ff.][15, S. 32ff.]

### ▪ Röntgenfilm

Die Intensitätsverhältnisse des durchstrahlten Materials werden bei der Radiografie durch einen Röntgenfilm aufgezeichnet. Beim Auftreffen der Röntgenstrahlung auf den Röntgenfilm reagiert das im Film enthaltene Silberbromid. Die Elektronen werden aus einem Gitterverbund gespaltet, sodass das positiv geladene Silber entladen und zu metallischem Silber umgewandelt wird. Je höher die Strahleneinwirkungen sind, desto größer ist die Menge an Silberteilchen. Das nach dem Belichtungsvorgang entstehende Bild ist ein verborgenes, unsichtbares Abbild des durchstrahlten Materials, welches erst nach der Verarbeitung des Röntgenfilms in ein sichtbares Bild umgewandelt wird. [15, S. 32][17, S. 75ff.]

Abbildung 2.6 zeigt die schematische Verarbeitung eines Röntgenfilms.



**Abbildung 2.6: Vorgänge der Röntgenfilmverarbeitung**  
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [17, S. 88f.]

Im *Entwicklungsprozess* wird der Röntgenfilm in ein Entwicklerbad getaucht. Es handelt sich dabei um ein chemisches Bad, mit dem die Kontrastgebung zwischen dicken und dünnen Materialien ermöglicht wird. Im zweiten Vorgang, der *Zwischenwässerung*, wird der Entwicklungsvorgang gestoppt. Das Stoppen kann durch das Auswaschen der chemischen Entwicklerlösung mit Fließwasser oder durch die Zerstörung der Lösung durch ein Stopfbad erfolgen. Das unentwickelte Silberbromid wird dabei nicht entfernt, da es in Wasser unlöslich ist. Das führt dazu, dass der Röntgenfilm milchig wird und nachdunkelt. Um das zu verhindern, wird ein weiterer Vorgang durchgeführt. Bei der *Fixierung* wird Natriumthiosulfat verwendet, um das Silberbromid in Wasser löslich zu machen. Durch die Löslichmachung kann im vorletzten Vorgang der Film gründlich gereinigt werden. Die *Endwässerung* ist entscheidend für die Haltbarkeit von Filmen und muss gründlich durchgeführt werden, da die Filme bei nicht vollständiger Reinigung nachdunkeln können. Da-

mit sich keine größeren Tropfen auf dem Film bilden und somit Flecken entstehen, muss im letzten Vorgang, der *Filmtrocknung*, der Film getrocknet werden. [17, S. 88f.]

Aus dem Gesamtprozess der Filmverarbeitung wird deutlich, dass diese Art der Röntgenprüfung sehr aufwändig ist. Anhand eines Praxisbeispiels werden die Nachteile des Röntgenfilms deutlich. In einem Werk, in dem die geschweißten Längsnähte von Rohren geprüft werden müssen, fallen täglich bis zu 1.000 Röntgenaufnahmen an. Jede Aufnahme muss 12 Jahre lang zur Archivierung aufbewahrt werden, sodass hohe Logistik- und Lagerkosten entstehen. Zusätzlich fallen große Mengen an Chemikalien für die Filmentwicklung sowie deren Entsorgung an. Untersuchungen ergaben, dass erfahrene Filmauswerter nur ca. 70 bis 80 % aller Fehler finden. [17, S. 57] Eine automatische Auswertung der Röntgenbilder mit einer Software kann eine Verbesserung der Auswertung mit sich bringen. Dazu müssen die Röntgenbilder mit einem Scanner digitalisiert werden. Die Scannersysteme führen jedoch zu unvermeidlichen Qualitätsverlusten der Röntgenbilder. [17, S. 52]

Elektronische Detektoren sollen die genannten Nachteile kompensieren.

- **Elektronische Detektoren**

Bei elektronischen Detektoren werden die Röntgenbilder nicht auf analogen Röntgenfilmen aufgenommen, sondern in digitaler Form. Diese Detektoren bestehen aus lichtempfindlichen Bildpunkten (Pixel), die auf einer Fläche oder einer Zeile angeordnet sind. Eine auf den Bildpunkten aufgetragene Fluoreszenzschicht – auch Szintillator genannt – dient der Umwandlung der einfallenden Röntgenstrahlen zu Licht, welches anschließend mit Hilfe von Fotodioden in elektrische Ladungen umgewandelt wird. Das Auslesen der Ladungsträger geschieht mit Transistoren, die zeilen- oder spaltenweise angesteuert werden. [15, S. 38ff.][21, S. 204]

Je nach Anwendungszweck werden Flächendetektoren oder Zeilendetektoren verwendet, die sich in der Ansteuerung der Transistoren sowie der Pixelanordnung unterscheiden. Bei den Flächendetektoren sind die Pixel in Form einer Matrix angeordnet, mit dem zeitgleich ein zweidimensionales Bild aufgenommen wird [15, S. 41]. Das Prüfobjekt darf dabei nicht bewegt werden.

- **Zeilendetektoren**

Bei den Zeilendetektoren werden eindimensionale Bilder aufgenommen und zusammengesetzt, sodass ein zweidimensionales Bild entsteht. Die Aufnahme der Röntgenaufnahme setzt eine Bewegung voraus – die Bewegung des Prüfobjektes oder eine Bewegung des Zeilendetektors. Durch die Bewegung wird das Prüfobjekt nacheinander von der Detektorzeile aufgenommen. Aus diesem Grund findet hier nur eine spaltenweise Ansteuerung der Transistoren statt. Es ist jedoch erforderlich, dass die Bewegungsgeschwindigkeit mit der Aufnahmefrequenz des Zeilendetektors synchronisiert werden muss. Bei kei-

ner vorhandenen Synchronisierung entsteht ein Versatz der Bildinformationen. Dieser Versatz führt zu unscharfen oder verzerrten Bildaufnahmen der Objekte.

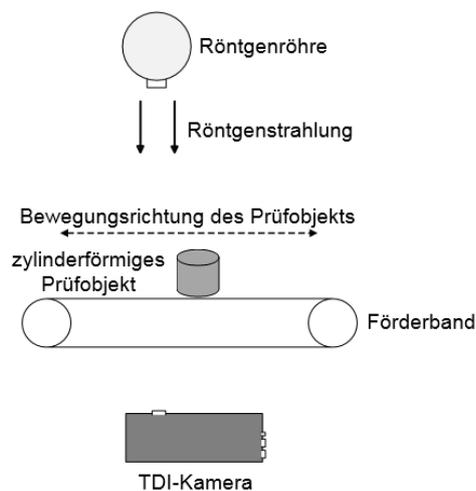
Ein großer Nachteil der Zeilenkamera ist jedoch die kurze Aufnahmegeschwindigkeit der einzelnen Zeilenbilder. Je schneller die Objekte bewegt werden, desto kürzer ist die Zeitspanne, in denen die Zeilenbilder belichtet werden können. Diese kurze Belichtungszeit hat den Nachteil, dass die Grauwerte der Pixel geringer werden und das Bild dunkler erscheint. Folglich wird der Mittelwert der Grauwerte geringer, wodurch sich das Verhältnis der Signal-Leistung zur Rausch-Leistung des Bildes verschlechtert. Dieses Verhältnis wird Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, engl. signal-to-noise-ratio) bezeichnet und wird in der Bildverarbeitung als Verhältnis zwischen dem mittleren Grauwertes  $g_\mu$  zur Standardabweichung  $\sigma$  des Bildes definiert [2, S. 114].

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \cdot \frac{g_\mu}{\sigma} \text{ dB} \quad (2.4)$$

Abhilfe bringen eine stärkere Strahlungsquelle sowie eine geringere Bewegungsgeschwindigkeit des Prüfobjektes oder des Zeilendetektors. Beides hat einen Einfluss auf eine höhere Beleuchtungsstärke, sodass der mittlere Grauwert der Pixel größer und das SNR verbessert wird. In der Praxis bringt eine stärkere Strahlungsquelle jedoch höhere Kosten mit sich. Höhere Kosten entstehen durch eine leistungsstärkere Röntgenröhre sowie durch höhere Schutzmaßnahmen vor der Röntgenstrahlung. Möglich ist dabei eine dickere Bleiummantelung der Strahlenschutzkabine oder ein größerer Sicherheitsabstand zwischen der Röntgenröhre und dem Anwender.

○ **TDI-Kamera**

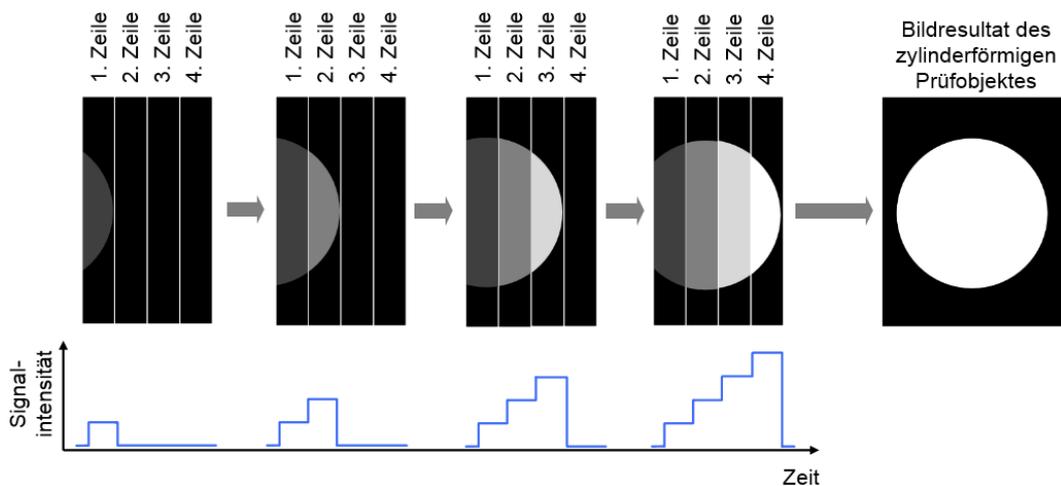
Die TDI-Kamera gehört zu der Gruppe der Zeilendetektoren. Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft die Bildaufnahme von Prüfobjekten in der Bewegung.



**Abbildung 2.7: Aufnahme von bewegten Prüfobjekten mit der TDI-Kamera**

Die TDI-Kamera besitzt im Gegensatz zu den „einfachen“ Zeilenkameras 128 physikalisch aneinandergereihte Zeilen. Bewegt sich das Prüfobjekt entlang der TDI-Kamera, wird jeder Teil des Prüfobjektes von allen aufeinanderfolgenden Zeilen erfasst.

In Abbildung 2.8 wird das Prinzip der Zeilenaufnahmen anhand von vier Zeilen dargestellt. Bewegt sich ein zylinderförmiges Objekt entlang der TDI-Kamera, wird jeder Abschnitt des Objektes von allen vier Zeilen der Reihe nach aufgenommen. Die entstehenden Teilbilder, die als Zeilenbilder dargestellt werden, werden während der Aufnahme miteinander integriert. Diese Integration führt dazu, dass die gleichen Bildausschnitte übereinandergelegt werden, sodass die Bildintensität (Signalintensität) mit jedem weiteren Zeilenbild ansteigt. Am Ende des Auslesevorganges wird das vollintegrierte Signal ausgelesen. [26, S. 2]



**Abbildung 2.8: Funktionsprinzip der TDI-Kamera mit vier Zeilen**  
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [26, S. 2])

Je höher die Signalintensität ist, desto größer werden die Grauwerte der Pixel, das wiederum zu einem helleren Bild und einem besseren SNR führt. Dadurch entsteht ein kontrastreicheres Bild als bei den „einfachen“ Zeilendetektoren.

### **3 Analyse der TDI-Kamera anhand eines Teststands**

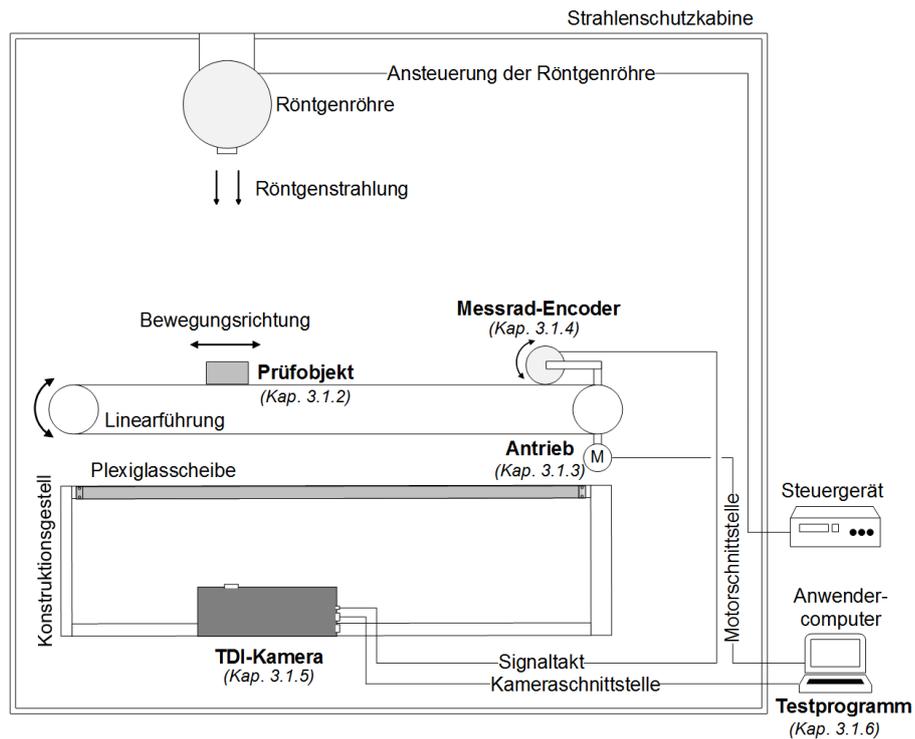
Das Ziel des Teststands ist die erstmalige Erprobung der TDI-Kamera. Aus diesem Grund beschreibt das folgende Kapitel den mechanischen Aufbau sowie die verwendeten elektronischen Bauteile des Teststands zur Analyse der TDI-Kamera. Hierbei wird die Funktionsweise des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Testprogramms beschrieben. Abschließend erfolgt die Evaluierung der aufgenommenen Röntgenbilder unter Variation der unterschiedlichen Einstellparameter der TDI-Kamera sowie der Abstände zwischen dem Prüfobjekt und der TDI-Kamera. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Kapitel werden für die Konzeptionierung des Röntgensystems in Kapitel 4 verwendet.

#### **3.1 Aufbau des Teststands**

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Aufbau des Teststands mit seinen einzelnen Komponenten beschrieben.

##### **3.1.1 Gesamtaufbau des Teststands**

Der Teststand wird aus Sicherheitsgründen in einer Strahlenschutzkabine aufgebaut. Eine auf dem Konstruktionsgestell befindliche Linearführung dient der Bewegung des Prüfobjektes. Dazu wird ein Antrieb benötigt. Als Strahlungsquelle wird eine an der Kabinendecke stationär eingerichtete Röntgenröhre mit einer maximalen Spannung von 200 kV und einer maximalen Stromstärke von 3 mA genutzt. Der Austrittsbereich der Röntgenstrahlung ist senkrecht nach unten gerichtet. Die TDI-Kamera muss sich innerhalb des Strahlungswinkels der Röntgenröhre befinden. Um das bewegte Prüfobjekt röntgen zu können, müssen die aus der Röntgenröhre austretenden Strahlen das Prüfobjekt durchdringen und in den strahlensensiblen Bereich der TDI-Kamera eindringen. Dort wandelt der Szintillator die Strahlung in sichtbares Licht um und die Lichtintensitäten werden von den dahinterliegenden Fotodioden aufgenommen. Hierzu muss die Linearführung zwischen der an der Decke befindlichen Röntgenröhre und der auf dem Boden stehenden TDI-Kamera platziert werden, sodass die Bewegungsrichtung des Prüfobjektes orthogonal zu den Röntgenstrahlen ist. Unter Variation der unterschiedlichen Kameraparameter werden während der verschiedenen Testläufe zudem die Abstände zwischen dem Prüfobjekt und der TDI-Kamera variiert. Zur Veränderung des Abstandes wird die TDI-Kamera angehoben. Die nachfolgende Abbildung 3.1 stellt den Aufbau des Teststands grafisch dar.



**Abbildung 3.1: Anordnung der Komponenten im Teststand**

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Komponenten des Teststands, ihre Analyse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse erläutert.

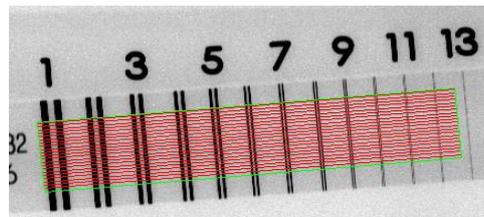
### 3.1.2 Prüfobjekt

Als Prüfobjekt für den Teststand wird ein Doppeldraht-Bildgüteprüfkörper (kurz: Doppeldraht-BPK) verwendet. Mit Hilfe dieses Prüfobjektes wird die Bildgüte der Röntgenbilder ermittelt. Es soll nachweisen, dass prüftechnische Regeln eingehalten wurden, die zur Erreichung einer guten Qualität der Röntgenaufnahme notwendig sind [17, S. 118]. Mit dem Doppeldraht-BPK wird die geometrische Unschärfe  $U_g$  nach DIN EN ISO 19232-5 bestimmt. Der Doppeldraht-BPK enthält Drahtpaare unterschiedlicher Durchmesser, die mit größer werdender Nummer einen kleineren Drahtdurchmesser sowie einen kleineren Drahtabstand zwischen den Drahtpaaren aufweisen. Die Dicke des ersten nicht mehr auflösbaren Drahtpaares entspricht der Unschärfe des Bildes. [17, S. 87] [17, S. 122] Der Doppeldraht-BPK ist in nachfolgender Abbildung 3.2 dargestellt.



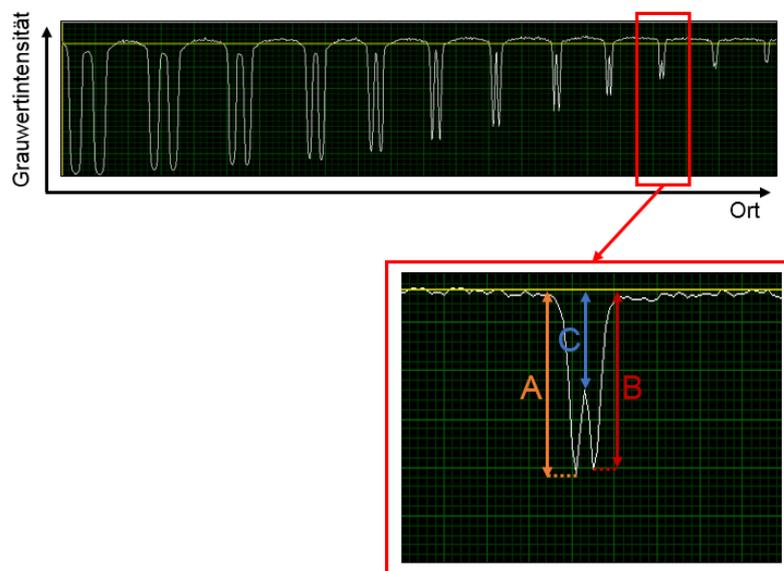
**Abbildung 3.2: Fotoaufnahme des Doppeldraht-BPKs für den Teststand**

Nach Erstellung eines Röntgenbildes des Doppeldraht-BPKs kann die Bildgüte mit einer Bildverarbeitungssoftware ausgewertet werden. Dazu wird auf dem Doppeldraht-BPK eine Profilfunktion angewendet, bei der mindestens 21 parallele Einzelzeilenprofile (rot dargestellt) über den Doppeldraht-BPK gelegt und gemittelt werden (siehe Abbildung 3.3). Nach DIN EN ISO 17636-2 müssen die Einzelzeilen 60 % der Breite des Doppeldraht-BPKs abdecken [11, S. 48].



**Abbildung 3.3: Röntgenbild des Doppeldraht-BPKs mit Anwendung der Profilfunktion**

Aus den gemittelten Einzelzeilen wird ein Grauwertprofil des Doppeldraht-BPKs erstellt und automatisch ausgewertet. Die Doppeldrähte sind auf dem Histogramm deutlich als Schwächung der Grauwertintensität dargestellt (siehe Abbildung 3.4). Die Lücke zwischen den zwei Drähten wird als Vertiefung (Dip) bezeichnet und dient der Differenzierbarkeit der Drähte.



**Abbildung 3.4: Histogramm der Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPKs**

Das Ergebnis für die geometrische Unschärfe ist das erste Drahtpaar mit einer Vertiefung von weniger als 20 % zwischen den Maxima der Grauwertvertiefung (C) in Bezug auf die gesamte Peakhöhe (Mittelwert von A und B) [11, S. 50]. Die Berechnung der Vertiefung findet innerhalb der Bildverarbeitungssoftware statt und berechnet sich nach Formel 3.1.

$$Dip = \frac{100 \cdot (A + B - 2C)}{(A + B)} \quad (3.1)$$

Die Auswertung des in Kapitel 4 konzeptionierten Röntgensystems wird anhand dieser Formel in einer Bildverarbeitungssoftware ausgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung der Röntgenbilder sind in Kapitel 5.1 zu finden.

### 3.1.3 Antrieb der Linearführung

Um den Doppeldraht-BPK im Teststand prüfen zu können, muss dieser von der Linearführung bewegt werden. Die Linearführung wird mit Hilfe eines bürstenlosen DC-Servomotors mit integriertem Controller angetrieben. Dabei handelt es sich um den Schrittmotor *PD4-N5918L4204* der Firma *Nanotec*, der über ein externes Netzteil mit einer Spannung von 24V DC versorgt wird. Die Kommunikation zwischen dem Schrittmotor und dem Anwendercomputer erfolgt über eine RS485-Schnittstelle. Damit der Datentransfer möglich ist, wird ein Schnittstellenumsetzer zwischen der USB-Schnittstelle des Computers und dem Schrittmotor zwischengeschaltet. Bei Drehung des Schrittmotors bewegen sich auf der Linearführung – über zwei an der Welle befindlichen Riemen – vier Schlitten. Auf diesen Schlitten befindet sich eine Kunststoffplatte, auf dem der Doppeldraht-BPK gelegt wird. Die Ansteuerung der Linearführung erfolgt über die Software *NanoPro* der Firma *Nanotec*, mit der verschiedene Fahrprofile erstellt werden können (siehe Abbildung 3.5). Werden die Fahrprofile auf die Steuerung übertragen, werden diese im EEPROM (engl.: electrically erasable and programmable read only memory) der Motorsteuerung gespeichert. Es handelt sich dabei um einen nichtflüchtigen Speicher. Beim Ausschalten der Schrittmotorsteuerung bleiben die Fahrprofile erhalten.

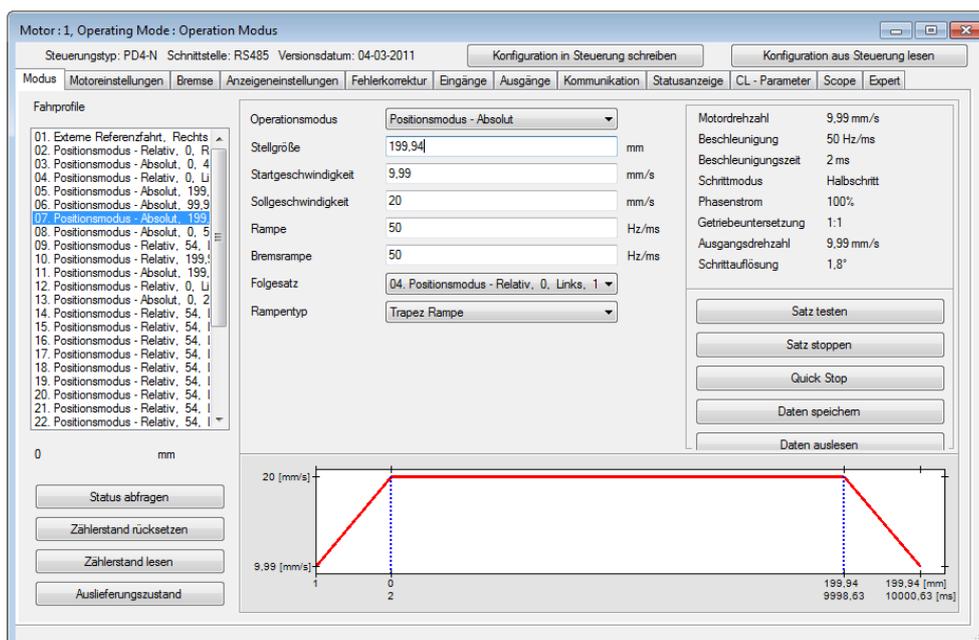


Abbildung 3.5: Beispielhafte Darstellung eines eingerichteten Fahrprofils in NanoPro

Um die Linearführung in beide Richtungen bewegen zu können, müssen zwei Fahrprofile erstellt werden – das Fahrprofil zur Rechtsdrehung des Motors bis die Endposition der Linearführung erreicht ist sowie das Fahrprofil zur Linksdrehung bis sich das Prüfobjekt wieder in der Anfangsposition befindet. Beide Fahrprofile werden nacheinander abgearbeitet und dauerhaft wiederholt.

### 3.1.4 Messrad-Encoder zur Synchronisierung der Bildaufnahmen

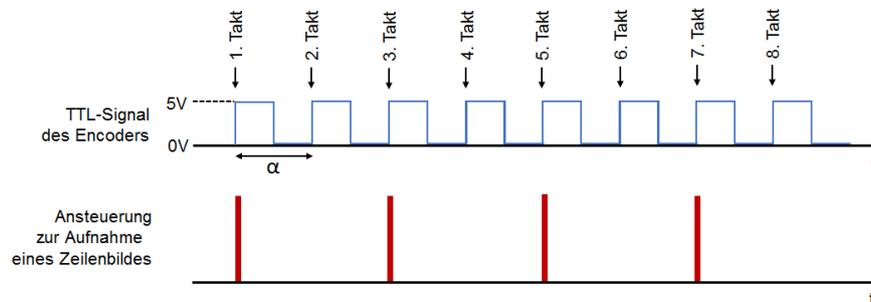
Für die Aufnahme von Röntgenbildern muss die Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Doppeldraht-BPKs auf der Linearführung synchronisiert werden. Bei fehlender Synchronisierung wird das Objekt verzerrt dargestellt, das zu einer Streckung oder Stauchung des Objektbildes führt.

Um eine Synchronisation durchzuführen, wird die TDI-Kamera über einen externen Signaltakt mit einer Spannung von 5 bis 12 Volt angesteuert. Die Ansteuerung führt zur Aufnahme der Zeilenbilder zum richtigen Zeitpunkt. Die Übergabe eines Signaltaktes an die Kamera erfolgt mit dem inkrementalen Messrad-Encoder *DFV60A-22PC65536* der Firma *SICK*. Dieser Encoder besitzt ein fest montiertes Messrad. Dieses Messrad wird mit Hilfe einer Feder und deren Federspannung auf die Linearführung gedrückt, sodass sich dieses bei Bewegung des Doppeldraht-BPKs synchron mitdrehen kann. Bei Drehung des Messrades erzeugt der Encoder eine fest vorgegebene Anzahl an Impulsen. Diese Anzahl wird durch die eingestellte Auflösung im Encoder definiert. Die vom Encoder ausgehenden Signalimpulse sind sogenannte TTL-Signale, bei denen es sich um Rechteckimpulse mit einer Spannung von 5 Volt handelt. Durch die Synchronisierung des Messrades wird eine beliebige Bewegungsgeschwindigkeit der Linearführung ermöglicht. Bei Änderung der Bewegungsgeschwindigkeit verhält sich der Messrad-Encoder proportional, sodass die für die Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera dienenden Signaltakte sich an die Geschwindigkeitsänderung anpassen. Der gewählte Messrad-Encoder hat den Vorteil, dass die Auflösung mit Hilfe eines Programmieradapter der Firma *SICK* verändert werden kann. Leider hat der Einsatz des Programmieradapters den Nachteil, dass der programmierbare Encoder aus dem laufenden Prozess entnommen und mit dem Programmieradapter sowie einem Computer verbunden werden muss. Während des Testlaufs wird die Auflösung auf den maximalen Wert von 65.536 eingestellt, sodass bei einem Winkel von  $0,0055^\circ$  jeweils ein Taktsignal an die TDI-Kamera übertragen wird.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{\text{Auflösung}} = \frac{360^\circ}{65.536} = 0,0055^\circ \quad (3.2)$$

Aufgrund der fest eingestellten Encoderauflösung muss mit Hilfe des Kameraparameters *Position Encoder* der Kameratakt an die geometrische Vergrößerung bzw. an den Abbildungsmaßstab angepasst werden. Die Änderung des Parameters kann softwareseitig in der Kamera eingestellt werden. Für den Parameter *Position Encoder* können ausschließlich positive Ganzzahlen verwendet werden, die dann als Teiler für den Kameratakt die-

nen. Wird beispielsweise der Parameter auf zwei gestellt, wird nur bei jedem zweiten Takt eine Zeilenaufnahme durchgeführt, wie es in Abbildung 3.6 grafisch dargestellt wird. Die dazwischenliegenden Takte werden von der Kamera vernachlässigt und üben keine Zeilenaufnahme aus. [29, S. 3f.]



**Abbildung 3.6: Taktsignale zur Ansteuerung der Zeilenbilder**

Man spricht hierbei auch von der sogenannten effektiven Auflösung, die mit der Formel 3.3 berechnet wird [29, S. 4]. Bei Anwendung der Formel wird in diesem Beispiel mit dem Kameraparameter *Position Encoder* mit einem Wert von 2 eine effektive Auflösung von 32.768 berechnet.

$$R_{\text{effektiv}} = \frac{R_{\text{Encoder}}}{P_{\text{PosEnc}}} = \frac{65.536}{2} = 32.768 \quad (3.3)$$

Diese Synchronisierung bringt einige Nachteile mit sich. Da für den Parameter *Position Encoder* ausschließlich Ganzzahlen verwendet werden können, kann die effektive Auflösung nicht exakt eingestellt werden. Mit der eingestellten Auflösung von 65.536 können nur die in Tabelle 3.1 dargestellten effektiven Auflösungen erreicht werden.

**Tabelle 3.1: Berechnete effektive Encoderauflösungen**

Eingestellte Encoderauflösung 65.536	
Position Encoder	Effektive Encoderauflösung
1	65.536
2	32.768
3	21.845
4	16.384
5	13.107
6	10.923
7	9.362
8	8.192
9	7.282
10	6.554
...	...

Die Erkenntnisse aus dieser Synchronisierung werden für die Entwicklung des Testprogramms in Kapitel 3.1.6 verwendet. Anhand der in Kapitel 3.2 durchgeführten Bildaufnahmen wird diese Synchronisierung bewertet.

### 3.1.5 TDI-Kamera

Zum Testen des Funktionsprinzips der TDI-Kamera wird die Software X88 des Kameraherstellers X-Scan verwendet. Diese Software ermöglicht die Einstellung unterschiedlicher Kameraparameter, die in der Bedienoberfläche in Abbildung 3.7 gezeigt werden.

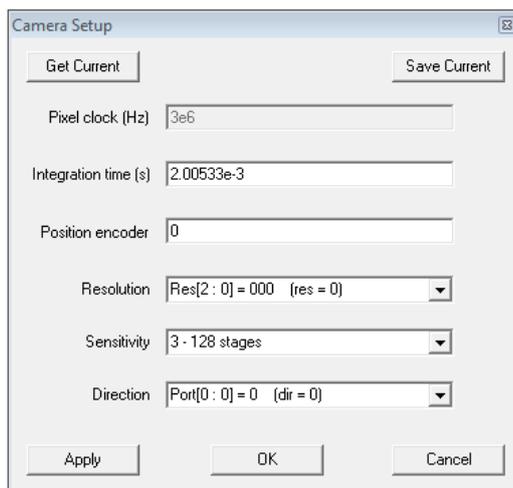


Abbildung 3.7: Einstellbare Kameraparameter in der Software X88

In folgender Tabelle 3.2 sind die wichtigsten einstellbaren Parameter der TDI-Kamera beschrieben.

Tabelle 3.2: Übersicht der wichtigsten Einstellparameter der TDI-Kamera

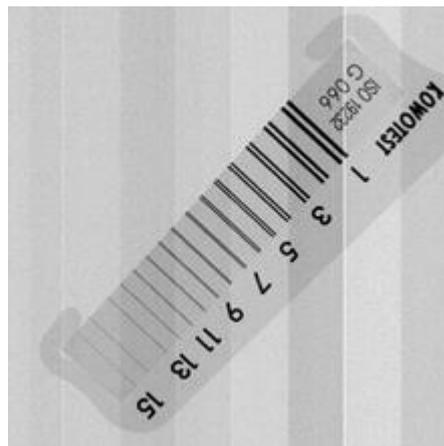
Kamera-parameter	Beschreibung des Kameraparameters
<b>Integration time</b>	Die Integrationszeit stellt die Zeit dar, mit der die Zeilenbilder miteinander integriert werden. Die Signalintensität des Bildes ist dabei proportional zu der Integrationszeit. Ist eine höhere Integrationszeit eingestellt, werden die Bilder heller, was jedoch dazu führt, dass die Bewegungsgeschwindigkeit der Prüfobjekte verringert werden muss. Somit wird gewährleistet, dass das Abbild des Prüfobjektes unverzerrt dargestellt wird. [27, S. 8]
<b>Position Encoder</b>	Mit Hilfe dieses Parameters kann eingestellt werden, ob die Bildaufnahmen in Abhängigkeit eines externen Kamerataktes durchgeführt werden oder die Kamera in einem sogenannten Freilauf betrieben werden soll. Wird die Kamera im Freilauf betrieben, muss die Integrationszeit vom Anwender manuell eingestellt werden. Wird ein externer Kameratakt verwendet, kann mit dem Kameraparameter <i>Position Encoder</i> der zeitliche Abstand zur Ansteuerung der Zeilenaufnahmen verändert werden. Dies

	<p>entspricht der Aufnahme­frequenz der TDI-Kamera. [25, S. 9] [28, S.14]</p> <p>Position encoder: <b>0</b> Freilauf</p> <p>Position encoder: <b>1</b> Jeder externe Kameratakt führt zur Aufnahme eines Zeilenbildes</p> <p>Position encoder: <b>2</b> Jeder zweite Kameratakt führt zur Aufnahme eines Zeilenbildes</p> <p>Position encoder: <b>3</b> Jeder dritte Kameratakt führt zur Aufnahme eines Zeilenbildes</p> <p>Position encoder: ...</p>
<b>Resolution</b>	<p>Mit dieser Einstellung werden benachbarte Pixel zusammengefasst und als ein Pixel dargestellt. Dieses Verfahren nennt man Pixelbinning und führt dazu, dass höhere Objektgeschwindigkeiten genutzt werden können. [24, S. 2] Dadurch verschlechtert sich die Bildauflösung der TDI-Kamera [26, S. 1], wodurch kleine Objektdetails nicht mehr erkennbar sind.</p>
<b>Sensitivity</b>	<p>Dieser Parameter ändert die Anzahl der in der Kamera genutzten Zeilen. Je mehr Zeilen für die Bildaufnahme genutzt werden, desto höher ist die Empfindlichkeit der TDI-Kamera. Eine höhere Empfindlichkeit führt zu kontrastreichereren Röntgenaufnahmen. [24, S. 2]</p> <p>Sensitivity: <b>0</b> Aufnahme des Bildes mit 32 Zeilen</p> <p>Sensitivity: <b>1</b> Aufnahme des Bildes mit 64 Zeilen</p> <p>Sensitivity: <b>2</b> Aufnahme des Bildes mit 96 Zeilen</p> <p>Sensitivity: <b>3</b> Aufnahme des Bildes mit 128 Zeilen</p>
<b>Direction</b>	<p>Die TDI-Kamera kann in beide Bewegungsrichtungen betrieben werden. Je nach Bewegungsrichtung des Prüfobjektes, muss die Ausleserichtung der Kamera angepasst werden. [24, S. 2]</p> <p>Direction: <b>0</b> Ausleserichtung links</p> <p>Direction: <b>1</b> Ausleserichtung rechts</p>

Zur besseren Verständlichkeit für den Leser wird im Nachfolgendem ein durchgeführter Testlauf mit seinen eingestellten Kameraparametern beschrieben sowie die daraus resultierenden Röntgenaufnahmen gezeigt. Der Kameraparameter *Position Encoder* wird auf den Wert 8 eingestellt, um den Doppeldraht-BPK auf der Röntgenaufnahme mit dem bloßen Auge unverzerrt erkennen zu können. Somit führt jeder achte ausgehende Takt des Encoders zu einer Zeilenaufnahme der TDI-Kamera. Aufgrund des externen Kameratakts entfällt die manuelle Einstellung der Integrationszeit. Um eine hohe Auflösung des Röntgenbildes zu ermöglichen, wird kein Pixelbinning (*Resolution = 0*) angewendet. Die Empfindlichkeit der TDI-Kamera wird auf die höchste Sensibilität eingestellt (*Sensitivity = 3*). Somit werden alle 128 nacheinander angeordneten Zeilen für die Röntgenaufnahme genutzt und erhöhen den Kontrast der Aufnahme. Der Doppeldraht-BPK wird mithilfe der

zwei Fahrprofile in beide Richtungen bewegt. Aus diesem Grund ist die Ausleserichtung der TDI-Kamera für den Teststand irrelevant und verbleibt auf dem Standardwert (*Direction = 0*).

Bei Einstellung der genannten Kameraparameter wird der Doppeldraht-BPK unverzerrt dargestellt, jedoch sind deutliche Streifenmuster in Bewegungsrichtung erkennbar (siehe Abbildung 3.8). Diese entstandenen Streifenmuster müssen mithilfe eines sogenannten Kalibrierverfahrens herausgerechnet werden müssen.



**Abbildung 3.8: Unkalibrierte Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPK (Rohbild)**

Da es sich bei der TDI-Kamera um einen elektronischen Detektor handelt, muss gemäß der Norm DIN EN ISO-17636-2 das vom Hersteller empfohlene Detektor-Kalibrierverfahren angewendet werden [11, S. 33]. Die Kalibrierung findet mithilfe eines Offset- und Gainbildes statt und wird mit der Herstellersoftware X88 durchgeführt.

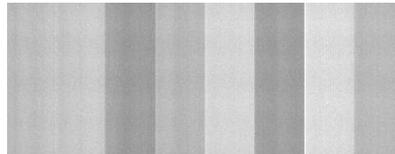
Das Offsetbild wird bei ausgeschalteter Röntgenstrahlung aufgenommen und dient der Kompensation von Dunkelstromeffekten. Diese Effekte werden aufgrund von Herstellungstoleranzen der Elektronikbauteile sowie durch Temperaturunterschiede hervorgerufen [14]. Diese Unterschiede führen zu unterschiedlich hellen Grauwerten, die als Streifenmuster in Abbildung 3.9 erkennbar sind.



**Abbildung 3.9: Offsetbild einer Röntgenaufnahme**

Anders als das Offsetbild muss das Gainbild bei eingeschalteter Röntgenstrahlung aufgenommen werden. Beim Einfallen der Röntgenstrahlung auf den strahlensensiblen Bereich der TDI-Kamera verhält sich jeder Pixel unterschiedlich (siehe Abbildung 3.10). Dieses

Verhalten wird durch die unterschiedliche Empfindlichkeit der Detektorelemente hervorgerufen und wird mit Hilfe des Gainbildes kompensiert [15, S. 43]. Um den Einfluss der Röntgenstrahlen auf die Detektorelemente herauszufinden, dürfen keine Gegenstände wie beispielsweise der Doppeldraht-BPK auf dem Bild aufgenommen werden, da diese die Röntgenstrahlen schwächen.

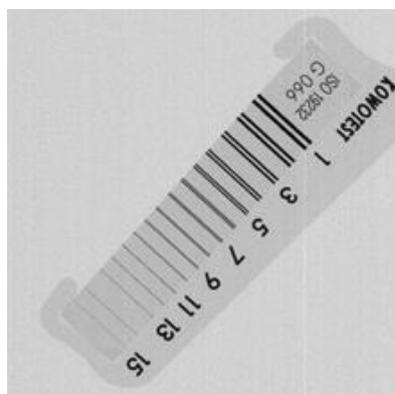


**Abbildung 3.10: Gainbild einer Röntgenaufnahme**

Nach Aufnahme der Kalibrierbilder werden diese zur Bildverarbeitung der Rohdaten des Röntgenbildes angewendet [11, S. 35]. Bei der Kalibrierung findet zunächst eine Offsetkorrektur und anschließend eine Gainkorrektur statt [14].

Bei der Offsetkorrektur werden die Grauwerte des Offsetbildes von den Grauwerten des unkalibrierten Röntgenbildes subtrahiert. Dadurch werden die Streifenmuster aus dem unkalibrierten Röntgenbild herausgerechnet. Ein offsetkalibriertes Röntgenbild entsteht.

Der Einfluss des Dunkelstromeffekts aus dem Offsetbild wirkt sich gleichermaßen auf das Gainbild aus, sodass die Grauwerte des Offsetbildes auch von dem Gainbild subtrahiert werden müssen. Auf Basis dieses Bildes wird der Mittelwert aller Grauwerte berechnet und dieser Mittelwert durch das Gainbild dividiert. Das Ergebnis dieser Berechnung führt zu den Empfindlichkeitsverhältnissen jedes einzelnen Pixels der TDI-Kamera. Die berechneten Verhältnisse werden daraufhin mit dem offsetkalibrierten Röntgenbild multipliziert. Dunkle Grauwerte werden dadurch zu helleren Grauwerten manipuliert und helle Grauwerte zu Dunkleren. Das führt zur Beseitigung des Streifenmusters, wie es in Abbildung 3.11 zu erkennen ist. Das Ergebnis ist die kalibrierte Röntgenaufnahme.



**Abbildung 3.11: Kalibrierte Röntgenaufnahme des Doppeldraht-BPKs**

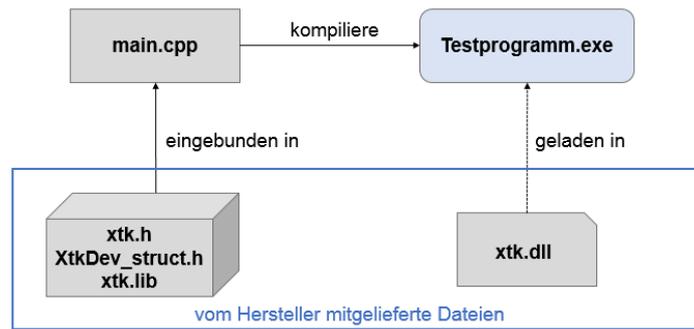
Im Rahmen des zu entwickelten Röntgensystems soll die TDI-Kamera unabhängig von der Herstellersoftware X88 genutzt werden. Um die TDI-Kamera mit deren Funktionen in

das System einbinden zu können, müssen die vom Hersteller mitgelieferten Dateien verwendet werden. Darunter befinden sich eine dynamische Programmbibliothek (DLL, engl. dynamic link library), eine Import-Datei sowie mehrere Header-Dateien. Die DLL beinhaltet Funktionen zur Ansteuerung der TDI-Kamera. Mittels der durchgeführten Analyse der TDI-Kamera im vorangegangenen Kapitel kann auf Basis der vom Hersteller mitgelieferten Dateien ein Testprogramm zur Aufnahme von Röntgenbildern entwickelt werden. Dieses entwickelte Testprogramm – ohne Verwendung der Herstellersoftware *X88* – wird im nachfolgendem Kapitel beschrieben.

### 3.1.6 Testprogramm

Das Testprogramm zur Durchführung der Röntgenaufnahmen wird auf dem Anwendercomputer betrieben. Der Fokus der Erstellung des Testprogrammes liegt auf dem Programmcode. Die Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche wird vernachlässigt. Das Testprogramm wird als C/C++-Konsolenanwendung erstellt, mit der einfache Anwendereingaben zur Durchführung von Röntgenaufnahmen möglich sein sollen. Um die Kamera unabhängig von der Software *X88* nutzen zu können, wurden vom Kamerahersteller eine dynamische Bibliothek (*.dll*), eine Import-Datei (*.lib*) und mehrere Header-Dateien (*.h*) mitgeliefert. Die dynamische Programmbibliothek *xtk.dll* beinhaltet Funktionen der Kamera, die während der Laufzeit des Testprogramms in den Arbeitsspeicher geladen werden. Dies hat den Vorteil, dass ausschließlich die benötigten Funktionen vom sogenannten Linker in das Programm geladen werden und nicht der gesamte Code der Funktionsammlung [7, S. 587]. Das Einbinden der dynamischen Bibliothek bringt für den Hersteller einen weiteren Vorteil. Durch das Aufrufen der Funktionen wird die exakte Abarbeitung des Codes innerhalb der Funktionen nicht preisgegeben und ist nicht manipulierbar. Um auf die DLL zugreifen zu können, muss die Import-Datei *xtk.lib* in das Programm eingebunden werden [23, S. 415]. Die Header-Dateien mit der Endung *.h* dienen der Deklaration der zu verwendeten Funktionen sowie der Deklaration der Kameravariablen. Diese Variablen besitzen unterschiedliche Datentypen und sind mit dem Schlüsselwort *struct* als Struktur zusammengefasst. Über einen Pointer wird auf die entsprechenden Variablen der Kamera verwiesen.

Die Herstellerdateien werden in die eigens entwickelte Quelltextdatei *main.cpp* eingebunden, in der sich die Hauptfunktion *main()* befindet. Diese Hauptfunktion stellt den Ablauf des Testprogramms dar. Wird das Programm kompiliert, wird eine Konsolenanwendung mit der Bezeichnung *Testprogramm.exe* erstellt, mit der die Funktionen der Kamera getestet werden können. Der Zusammenhang der Dateien ist in folgender Abbildung 3.12 visualisiert.



**Abbildung 3.12: Einbindung der Herstellerdateien in das Testprogramm**

Der prinzipielle Ablauf des Testprogramms wird in Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 dargestellt, in denen die Sprungmarken A und B zur Vereinfachung der Lesbarkeit des Programmablaufs dienen. Auf die Umsetzung dieses Programms wird im Nachfolgenden näher eingegangen.

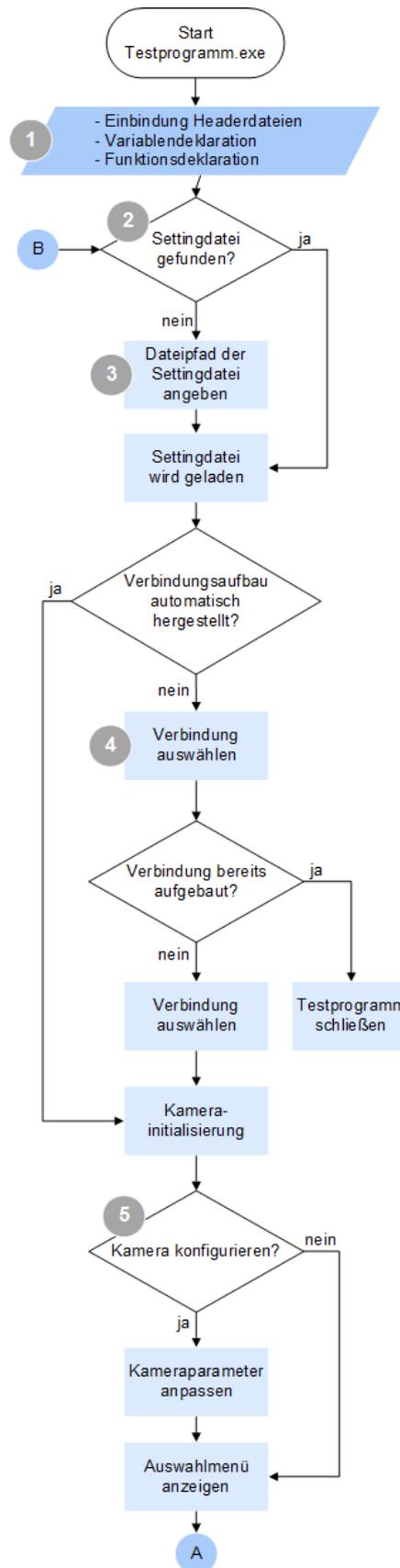


Abbildung 3.13: Programmablauf im Testprogramm (Teil 1)

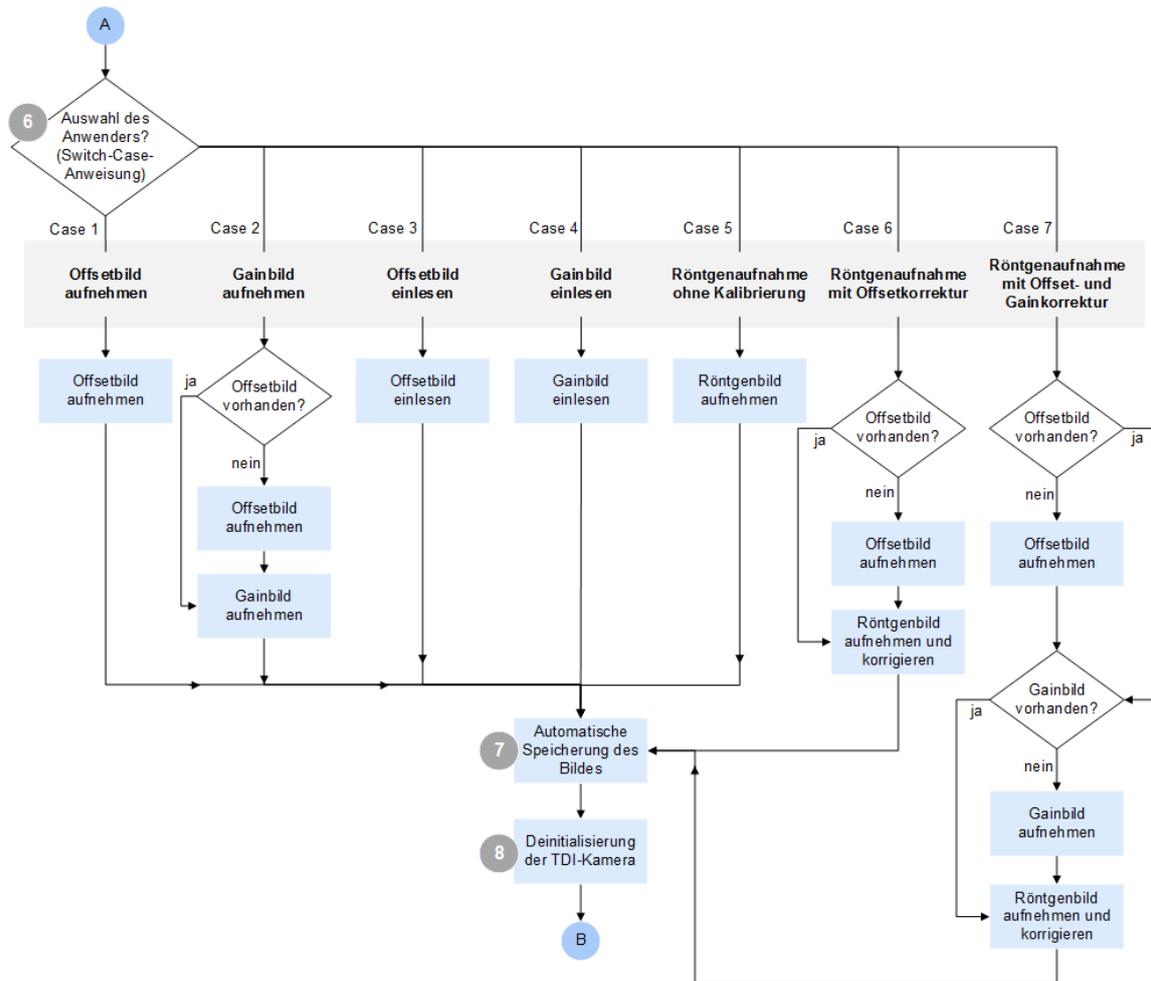


Abbildung 3.14: Programmablauf im Testprogramm (Teil 2)

Wird die Konsolenanwendung *Testprogramm.exe* gestartet, werden zuerst ① mehrere Header-Dateien eingebunden, auf die im Laufe des Programms zugegriffen wird. Der Zugriff erfolgt unter anderem auf die Header-Dateien *xtk.h*, *XtkDev\_struct.h* oder auch Standardfunktionsbibliotheken wie *stdlib.h*, *cstdio.h* oder *string.h*. Anschließend werden die zu verwendeten Variablen und Funktionen deklariert. Nach der Variablen- und Funktionsdeklaration wird das Hauptprogramm *main()* aufgerufen. Das Hauptprogramm besteht aus einer While-Schleife, um das Programm wiederholt ausführen zu können.

Um die TDI-Kamera nutzen zu können, muss eine Verbindung vom Computer zur TDI-Kamera aufgebaut werden. Als Schnittstelle dient das Gigabit-Ethernet-Vision-Protokoll (GigE Vision). Dabei handelt es sich um ein Ethernet basierendes Protokoll, welches zur Kommunikation sowie auch zum Datentransport zwischen dem Computer und der Kamera dient [47]. Um die Verbindung aufbauen zu können, werden die zur Verbindung erforderliche Netzwerkadresse sowie weitere Standardeinstellungen der Kamera benötigt. Diese Informationen werden aus einer Settingdatei *setting.xcf* entnommen, die über die

Funktion *fkt\_readSettingfile* automatisch in das Testprogramm eingebunden wird <sup>2</sup>. Ein hinterlegter Pfad weist auf diese Datei hin.

Falls die Datei nicht gefunden wird, muss der Pfad der Settingdatei manuell in das Konsolenprogramm eingetragen werden <sup>3</sup> (siehe Abbildung 3.15).

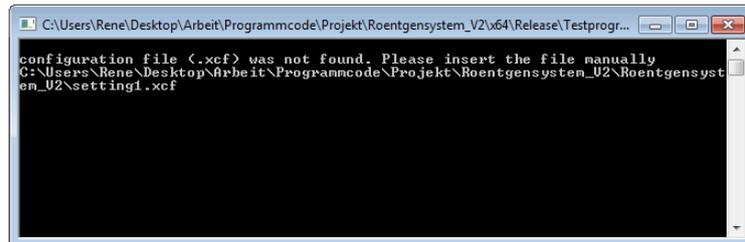


Abbildung 3.15: Manuelle Eintragung des Pfades für die Settingdatei

Innerhalb der Settingdatei befindet sich die Netzwerkadresse der TDI-Kamera. Kann die Netzwerkadresse nicht automatisch ausgelesen werden, muss die Kamera manuell über das Auswahlfenster, welches in Abbildung 3.16 dargestellt ist, ausgewählt werden <sup>4</sup>.

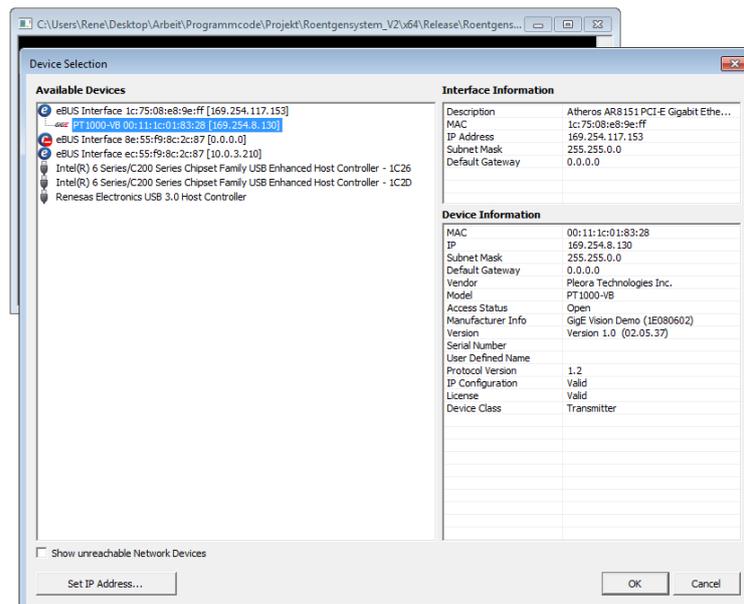
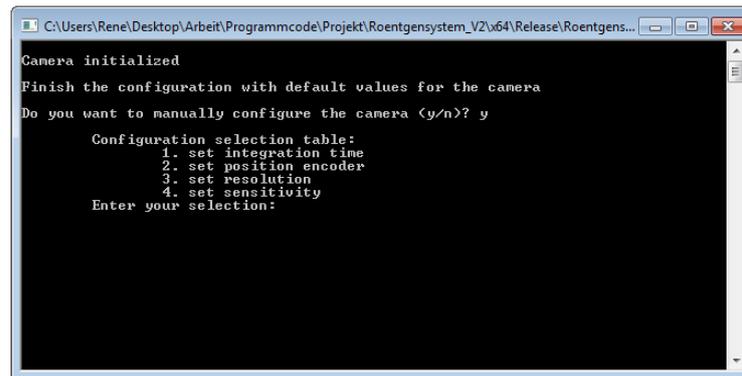


Abbildung 3.16: Auswahlfenster zum Verbindungsaufbau zur TDI-Kamera

Nachdem die Verbindung zur Kamera aufgebaut und die Standardparameter geladen wurden, findet die Abfrage statt, ob eine manuellen Konfiguration der TDI-Kamera durchgeführt werden soll. Wenn eine manuelle Konfiguration stattfinden soll, wird die Funktion *manual\_config(xtk\_p)* aufgerufen und ein Konfigurationsmenü angezeigt <sup>5</sup>. Dieses Menü ist in Abbildung 3.17 aufgezeigt.



**Abbildung 3.17: Konfigurationsmenü zur manuellen Änderung von Kameraparametern**

Mit Hilfe dieses Menüs kann die Integrationszeit, der externe Kameratakt, die Auflösung sowie die Sensibilität der Kamera manuell eingestellt werden. Um diese Werte an die Kamera zu übergeben, werden die folgenden Funktionen aus der mitgelieferten Dynamic Link Library *xtk.dll* verwendet. Mit Hilfe des Pointers *xtk\_p* werden die Werte an die Struktur *XtkDev* übergeben. Ein Ausschnitt des Programmcodes ist in der Abbildung 3.18 dargestellt.

```
void manual_config(XtkDev *xtk_p)
{
    ...
    xtk_set_Tint(xtk_p, Tint)
    ...
    xtk_set_posenc(xtk_p, posenc)
    ...
    xtk_set_resolution(xtk_p, res)
    ...
    xtk_set_sensitivity(xtk_p, sen)
    ...
}
```

**Abbildung 3.18: Programmausschnitt zur Anpassung der Kameraparameter**

Nachdem die Kameraeinstellungen getätigt wurden, wird über die Sprungmarke A eine Switch-Anweisung ausgeführt. Mit dieser Fallunterscheidung können unterschiedliche Programmfälle (Cases) durchlaufen werden <sup>6</sup>, in denen jeweils mehrere Funktionen aufgerufen werden. Diese Funktionen dienen zum Einlesen von vorhandenen Kalibrierbildern oder zur Durchführung von Röntgenaufnahmen (siehe Abbildung 3.19). Im Folgenden werden die unterschiedlichen Cases der Switch-Anweisung beschrieben.

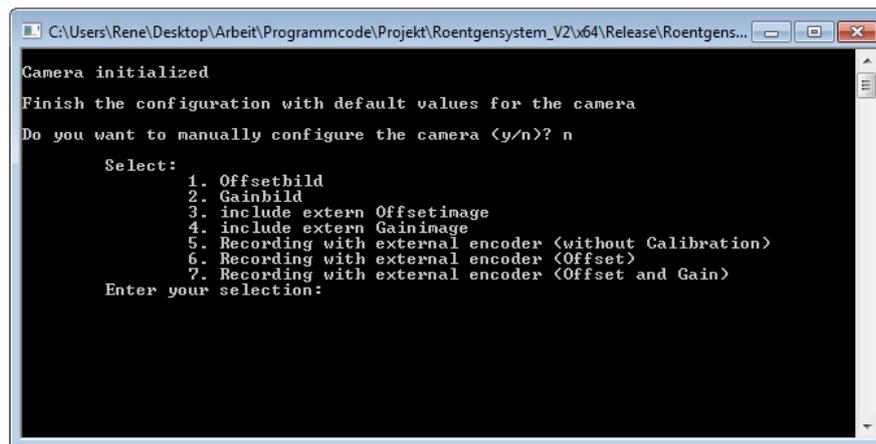


Abbildung 3.19: Switch-Anweisung zur Abfrage unterschiedlicher Programmfälle

Wie bereits in Kapitel 3.1.5 beschrieben, müssen die Rohbildaufnahmen kalibriert werden. Dazu wird ein Offset- und ein Gainbild benötigt, die jeweils in *Case 1* und *Case 2* aufgenommen werden können. Hierzu werden 500 Zeilenbilder mit jeweils einer Bildbreite von 2.064 Pixel aufgenommen, der Mittelwert der Zeilenbilder berechnet und anschließend die gemittelte Zeile als Bilddatei gespeichert. Die gespeicherte Bilddatei besitzt demnach eine Bildlänge von einem Pixel und einer Bildbreite von 2.064 Pixel.

Sind bereits Offset- und Gainbild vorhanden, können diese über den *Case 3* und *Case 4* eingebunden werden, um sie bei der Kalibrierung mit einzubeziehen. Wenn eine unkalibrierte Röntgenaufnahme gemacht werden soll, kann der *Case 5* ausgeführt werden. Hier werden nacheinander verschiedene Funktionen aufgerufen, die eine Bildaufnahme ohne Kalibrierung ermöglicht. Der *Case 6* dient zur Erstellung einer offsetkalibrierten Bildaufnahme. Das Gainbild wird in diesem Case nicht berücksichtigt. Nachdem alle Zeilenbilder aufgenommen wurden, wird eine Berechnung des Bildes durchgeführt, in der jede aufgenommene Bildzeile mit dem Offsetbild kalibriert wird. Die Kalibrierung erfolgt durch die Subtraktion des Offsetbildes von dem Rohbild.

Um ein offset- und gainkalibriertes Röntgenbild aufzunehmen, muss der *Case 7* ausgeführt werden. Zu Beginn wird darauf hingewiesen, die Röntgenstrahlung einzuschalten. Nach Einschalten der Strahlung muss die Anzahl der aufzunehmenden Zeilen eingetragen werden. Nach erfolgter Bildaufnahme aller Zeilen findet eine automatische Speicherung der Bilddatei statt <sup>7</sup>.

Nach Beendigung des Speichervorganges wird die TDI-Kamera deinitialisiert <sup>8</sup>. Durch die Deinitialisierung kann das Testprogramm fehlerfrei geschlossen werden, da die Verbindung zur TDI-Kamera bereits getrennt wurde. Falls weitere Röntgenaufnahmen durchgeführt werden sollen, gelangt der Anwender über die Sprungmarke B zum automatischen Einlesen der Settingdatei <sup>2</sup> sowie dem damit einhergehenden Verbindungsaufbau zur TDI-Kamera.

Aus der Entwicklung des gesamten Testprogramms können Rückschlüsse auf die sequenzielle Abarbeitung der notwendigen Funktionen für die Nutzung der TDI-Kamera ge-

zogen werden. Diese Kenntnisse werden für die programmtechnische Konzeptionierung und Umsetzung in Kapitel 4.4 verwendet.

### 3.2 Durchführung und Evaluierung der Testaufnahmen

Das Ziel des entwickelten Teststands ist die Aufnahme von Röntgenbildern eines Doppeldraht-BPK. Diese Röntgenbilder sollen Aufschlüsse über die Bildgüte sowie auf mögliche Bildfehler geben. Die Erkenntnisse daraus werden für das zu entwickelnde Röntgensystem in Kapitel 4 genutzt.

#### 3.2.1 Auswirkung der geometrischen Vergrößerung

Mit Hilfe des Testaufbaus werden Röntgenaufnahmen bei unterschiedlichen Abständen zwischen der TDI-Kamera und dem Prüfobjekt durchgeführt. Diese Tests sollen Rückschlüsse auf den Einfluss der geometrischen Vergrößerung  $V$  sowie der damit einhergehenden geometrischen Unschärfe  $U_g$  auf die Bildaufnahmen bringen. Beide Aufbauten unterscheiden sich lediglich im Abstand zwischen dem Prüfobjekt und der TDI-Kamera (siehe Abbildung 3.20-a und Abbildung 3.20-b).

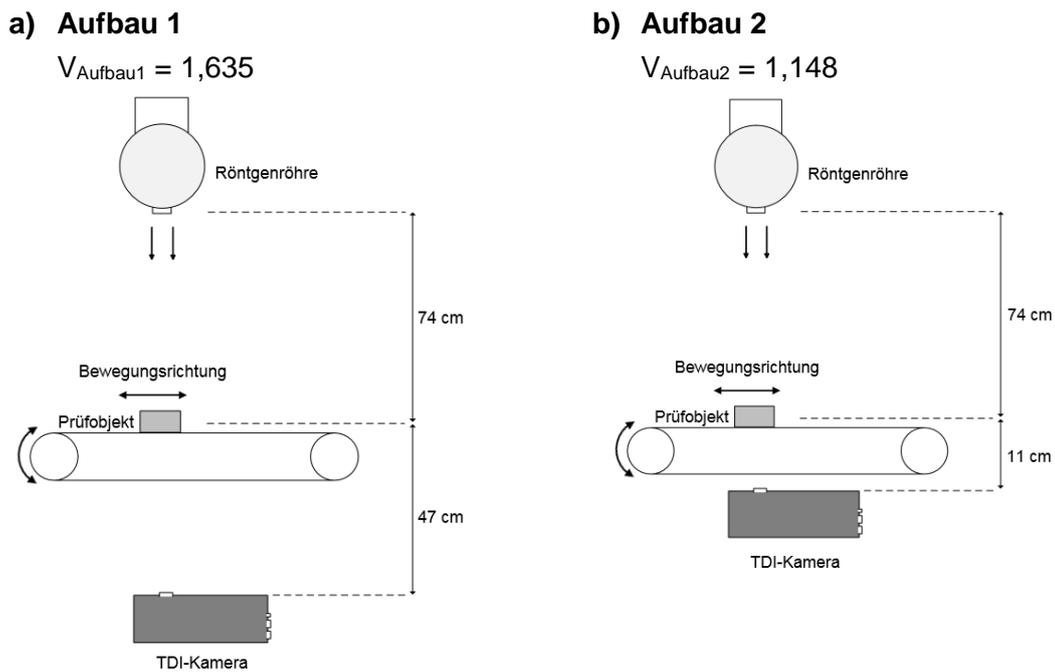


Abbildung 3.20: Testaufbau mit unterschiedlichen Vergrößerungen  $V$

Aus der Berechnung der Vergrößerungen beider Aufbauten werden Unterschiede sichtbar. Die Vergrößerung des Aufbaus 1 ist deutlich größer als die des Aufbaus 2. Grund hierfür ist der größere Abstand zwischen der TDI-Kamera und dem Doppeldraht-BPK.

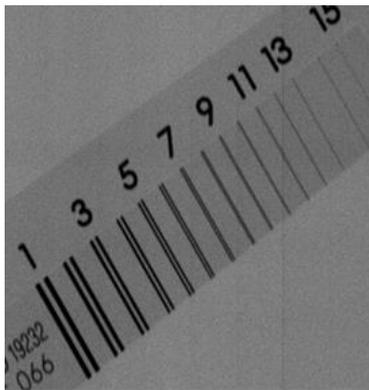
$$V_{\text{Aufbau1}} = \frac{FDA}{FOA} = \frac{74 \text{ cm} + 47 \text{ cm}}{74 \text{ cm}} = 1,635 \quad (3.4)$$

$$V_{\text{Aufbau2}} = \frac{FDA}{FOA} = \frac{74 \text{ cm} + 11 \text{ cm}}{74 \text{ cm}} = 1,149 \quad (3.5)$$

Aufgrund des größeren Abstandes wird das Abbild des Doppeldraht-BPKs auf den Röntgenaufnahmen größer dargestellt als in Aufbau 2. Der Maßstab des Abbildes wird somit verändert. Diese Änderung des Abbildungsmaßstabs ist in der Abbildung 3.21-a und Abbildung 3.21-b ersichtlich.

**a) Aufbau 1**

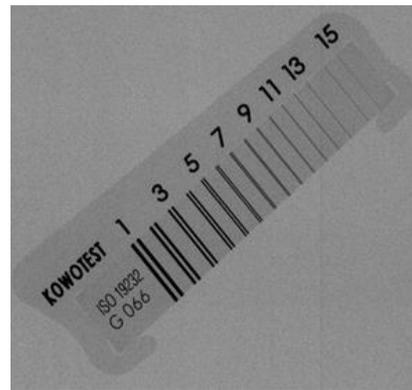
Position Encoder: 6



Unschärfe des Bildes: D7

**b) Aufbau 2**

Position Encoder: 8



Unschärfe des Bildes: D10

**Abbildung 3.21: Einfluss der Vergrößerung auf unterschiedliche Vergrößerungen**

Anhand der unterschiedlichen Aufbauten und der damit einhergehenden Vergrößerung wurde festgestellt, dass zur unverzerrten Darstellung des Doppeldraht-BPKs verschiedene Aufnahmefrequenzen benötigt werden. Je stärker die Vergrößerung, desto schneller muss der Kameratakt sein. Aus diesem Grund ist bei dem Aufbau 1 mit einer Vergrößerung von  $V = 1,635$  der Kameraparameter *Position Encoder* auf den Wert 6 eingestellt, sodass dann nur noch jeder sechste ausgehende Takt des Messrad-Encoders eine Zeilenaufnahme in der TDI-Kamera ausübt. Bei der Vergrößerung von  $V = 1,149$  wird der Parameter *Position Encoder* auf acht eingestellt, sodass nur noch bei jedem achten Takt des Encoders eine Zeilenaufnahme gemacht wird. Die Aufnahmefrequenz der Zeilenbilder ist im Gegensatz zu dem Aufbau 1 niedriger. Das Resultat aus diesem Test ist die Abhängigkeit der Vergrößerung zu der Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera.

Die unterschiedlichen Vergrößerungen der Aufbauten bringen weitere Erkenntnisse. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, sollte aufgrund des nicht punktförmigen Brennflecks der Detektor so nah wie möglich an das Prüfobjekt positioniert werden. Dadurch stellt sich eine Vergrößerung von circa 1 ein, sodass die geometrische Unschärfe möglichst gering ist. Mit Hilfe der firmeneigenen Bildverarbeitungssoftware werden diese Auswirkungen der Vergrößerung auf die geometrische Unschärfe sichtbar.

Bei der Röntgenaufnahme im Aufbau 1 mit einer Vergrößerung von  $V = 1,635$  können die nebeneinanderliegenden Drähte des sechsten Doppelpaares (D6) über den Grenzwert

von 20 % aufgelöst werden. Bei dem siebten Doppeldraht (D7) liegen die Grauwerte der Vertiefung zwischen diesen Drähten unter 20 % und sind somit schlecht differenzierbar. Das erste nicht mehr auflösbare Drahtpaar entspricht der Unschärfe des Röntgenbildes. In Aufbau 1 stellt der Doppeldraht D7 die geometrische Unschärfe dar. Bei dem Aufbau 2 mit einer Vergrößerung von  $V = 1,149$  kann hingegen bis zu dem neunten Doppeldraht (D9) aufgelöst werden. Die geometrische Unschärfe des Röntgenbildes für den Aufbau 2 entspricht D10.

Nach der Norm 17636-2:2013 für Schweißnahtprüfung muss jedoch eine geometrische Unschärfe von D12 bei einem zu prüfenden Rohr mit einer Materialstärke von 5 mm aufgelöst werden [11, S. 47]. Das bislang erreichte Ergebnis der Bildgüte beider Aufbauten ist somit ungenügend. Um das Röntgenbild möglichst gut auflösen zu können, muss die TDI-Kamera möglichst dicht an das zu prüfende Objekt positioniert werden. Zusätzlich wird im Folgenden die genutzte Synchronisierung analysiert, um weitere mögliche Optimierungen daraus ableiten zu können.

In Abhängigkeit der Vergrößerung muss die Aufnahme­frequenz exakt angepasst werden. Wie bereits in Kapitel 3.1.5 beschrieben wurde, können anhand des Kameraparameters *Position Encoder* nur festdefinierte effektive Auflösungen als Aufnahme­frequenz für die TDI-Kamera eingestellt werden. Um die exakt benötigten Auflösungen beider Aufbauten einstellen zu können, werden im Folgenden die Aufnahme­frequenzen  $f_{\text{benötigt}1/2}$  ermittelt.

Die Röntgenaufnahmen werden mit einer Bewegungsgeschwindigkeit des Prüfobjekts auf der Linearführung von 2 cm/s durchgeführt. Der parallel mitlaufende Messrad-Encoder hat einen Umfang von 30 cm und eine eingestellte Auflösung von 65.536.

Es wurde festgestellt, dass im Aufbau 1 bei Einstellung des Kameraparameters *Position Encoder* auf den Wert 6 keine Verzerrungen im Röntgenbild des Doppeldraht-BPKs entstanden sind. Die effektive Auflösung für die TDI-Kamera  $R_{\text{effektiv}1}$  beträgt demnach 10.923 Impulse pro Umdrehung des Encoders. Bei dem Aufbau 2 hingegen wird ein unverzerrtes Abbild des Doppeldraht-BPKs bei dem Kameraparameter *Position Encoder* auf dem Wert 8 erreicht. Dies entspricht einer effektiven Auflösung  $R_{\text{effektiv}2}$  von 8.192.

$$R_{\text{effektiv}} = \frac{R_{\text{Encoder}}}{P_{\text{PosEnc}}} \quad (3.6)$$

$$R_{\text{effektiv}1} = \frac{65.536}{6} = 10.923$$

$$R_{\text{effektiv}2} = \frac{65.536}{8} = 8.192$$

Die genutzten Aufnahme­frequenzen beider Aufbauten werden mit Formel 3.7 berechnet.

$$f_{\text{verwendet}} = \frac{v_{\text{Objekt}}}{U_{\text{Encoder}}} \cdot R_{\text{effektiv}} = \frac{v_{\text{Objekt}}}{U_{\text{Encoder}}} \cdot \frac{R_{\text{Encoder}}}{P_{\text{PosEnc}}} \quad (3.7)$$

$$f_{\text{verwendet}1} = \frac{2 \text{ cm/s}}{30 \text{ cm}} \cdot \frac{65.536}{6} = 728 \frac{1}{\text{s}} = 728 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{verwendet}2} = \frac{2 \text{ cm/s}}{30 \text{ cm}} \cdot \frac{65.536}{8} = 546 \frac{1}{\text{s}} = 546 \text{ Hz}$$

Für die unverzerrte Darstellung des Doppeldraht-BPKs wurde für die Synchronisierung des Aufbaus 1 eine Aufnahme­frequenz von 728 Hz verwendet. Bei dem Aufbau 2 wurde hingegen eine Aufnahme­frequenz von 546 Hz genutzt.

Anhand der Formel 3.8 wird die exakt benötigte Aufnahmezeit der Zeilenbilder  $t_{\text{benötigt}}$  ermittelt [33]. Bei der Aufnahmezeit handelt es sich um die Zeitspanne zwischen dem Beginn einer Zeilenaufnahme bis Ende einer Zeilenaufnahme. Innerhalb dieser Zeit wird die TDI-Kamera und dessen Zeile von der Röntgenstrahlung belichtet.

$$t_{\text{benötigt}} = \frac{p_{\text{Breite}}}{v_{\text{Objekt}} \cdot V} \quad (3.8)$$

$$t_{\text{benötigt}1} = \frac{48 \mu\text{m}}{0,02 \text{ m/s} \cdot 1,635} = 0,00146788 \text{ s}$$

$$t_{\text{benötigt}2} = \frac{48 \mu\text{m}}{0,02 \text{ m/s} \cdot 1,149} = 0,00208877 \text{ s}$$

Anschließend wird anhand der Aufnahmezeit  $t_{\text{benötigt}}$  eine Umrechnung für die Aufnahme­frequenz  $f_{\text{benötigt}}$  durchgeführt. Für den jeweiligen Aufbau ist diese Frequenz die benötigte Aufnahme­frequenz, die in dem Messrad-Encoder eingestellt werden muss, um eine bestmögliche Synchronisierung zwischen der Aufnahme­geschwindigkeit der TDI-Kamera und der Bewegung­geschwindigkeit des Prüfobjektes bei gegebener geometrischer Ver­größerung  $V$  zu erreichen.

$$f_{\text{benötigt}} = \frac{1}{t_{\text{benötigt}}} \quad (3.9)$$

$$f_{\text{benötigt}1} = \frac{1}{0,00146788 \text{ s}} = 681 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{benötigt}2} = \frac{1}{0,00208877 \text{ s}} = 479 \text{ Hz}$$

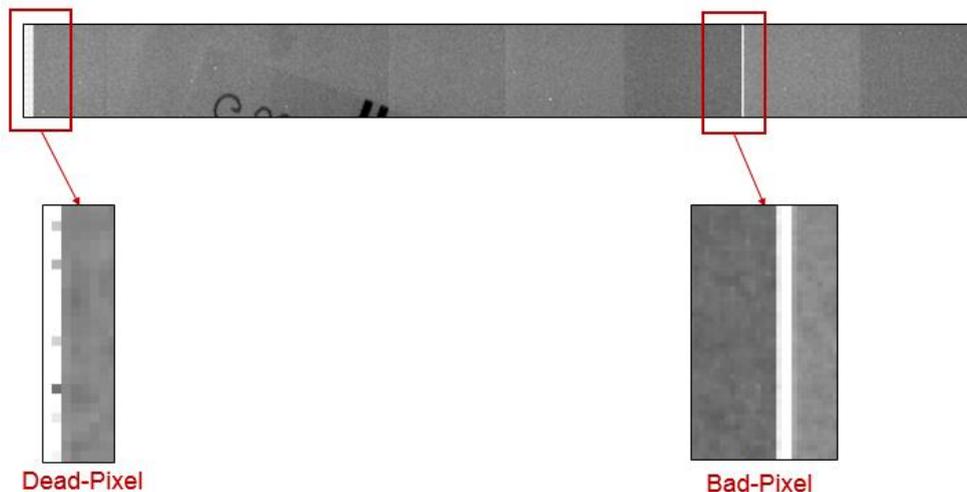
Ein Vergleich macht deutlich, dass die Aufnahme­frequenzen  $f_{\text{verwendet}}$  beider Aufbauten nicht exakt mit den benötigten Aufnahme­frequenzen  $f_{\text{benötigt}}$  übereinstimmen. In Aufbau 1 wird eine Aufnahme­frequenz von 681 Hz benötigt, jedoch konnte der Kameratakt mit dem Kameraparameter *Position Encoder* nur auf eine Aufnahme­frequenz von 728 Hz einge-

stellt werden. Grund hierfür sind die ausschließlich nutzbaren Ganzzahlen für den Kameraparameter *Position Encoder*. Bei dem Aufbau 2 wurden die Zeilen mit einer Aufnahme­frequenz von 546 Hz angesteuert, wobei jedoch eine Frequenz von 479 Hz als Optimum berechnet wurde. Diese nicht exakte Synchronisierung der Zeilenaufnahmen führt dazu, dass sich die Bildgüte der Röntgenaufnahmen verschlechtert.

Die Einstellmöglichkeit mit Hilfe des Kameraparameters *Position Encoder* gelang keine exakte Einstellung der Auflösung. Aus diesem Grund muss eine andere Lösung zur Synchronisierung gefunden werden, die in Kapitel 4.3.2 beschrieben und umgesetzt wird.

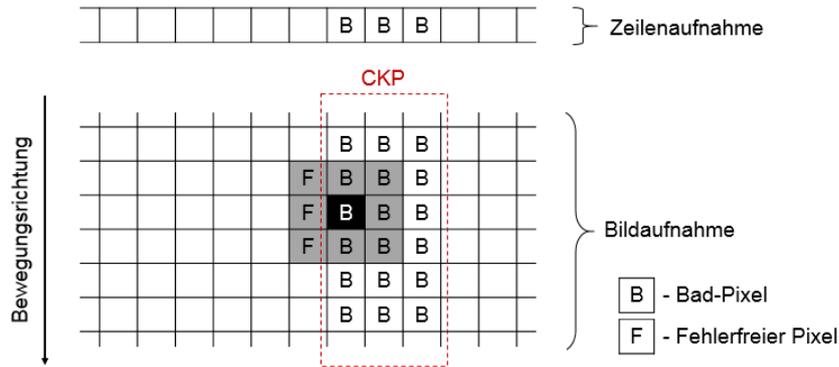
### 3.2.2 Pixelfehler

Bei den Testaufnahmen wurde festgestellt, dass mehrere Pixel fehlerhafte Bildinformation liefern. Es handelt sich hierbei um *Bad-Pixel* und *Dead-Pixel* (siehe Abbildung 3.22).



**Abbildung 3.22: Fehlerhafte Bildinformationen einer Röntgenaufnahme**

*Bad-Pixel* sind Pixel, die aufgrund eines defekten Detektorelements zu falschem Grauwert führen [9, S. 4] [11, S. 34]. Ist ein *Bad-Pixel* vorhanden, ist es zulässig, diesen Pixel durch eine Interpolation der Nachbarschaftspixel zu manipulieren [11, S. 34]. Die Manipulation wird mit einer Bildverarbeitungssoftware automatisch durchgeführt. Bei den Röntgenaufnahmen mit der TDI-Kamera sind jedoch drei nebeneinanderliegende Pixel defekt, die sich durch das Aneinanderreihen der Zeilenaufnahmen auf die gesamte Bildaufnahme entlang der Bewegungsrichtung des Prüfobjektes auswirken. Besitzen die defekten Pixel weniger als fünf fehlerfreie Pixel in ihrer Nachbarschaft, werden diese als *Cluster-Kernel-Pixel* (CKP) bezeichnet [9, S. 5]. Durch die drei defekten nebeneinanderliegenden Pixel besitzen die Pixel nicht ausreichend gute Pixel in deren Nachbarschaft (grau dargestellt) und werden daher als CKP bezeichnet (siehe Abbildung 3.23). Nach *DIN EN ISO 17636-2* sind CKP behaftete Detektoren für den Einsatz der Röntgenprüfung nicht empfehlenswert und sollten daher getauscht werden [11, S. 34].

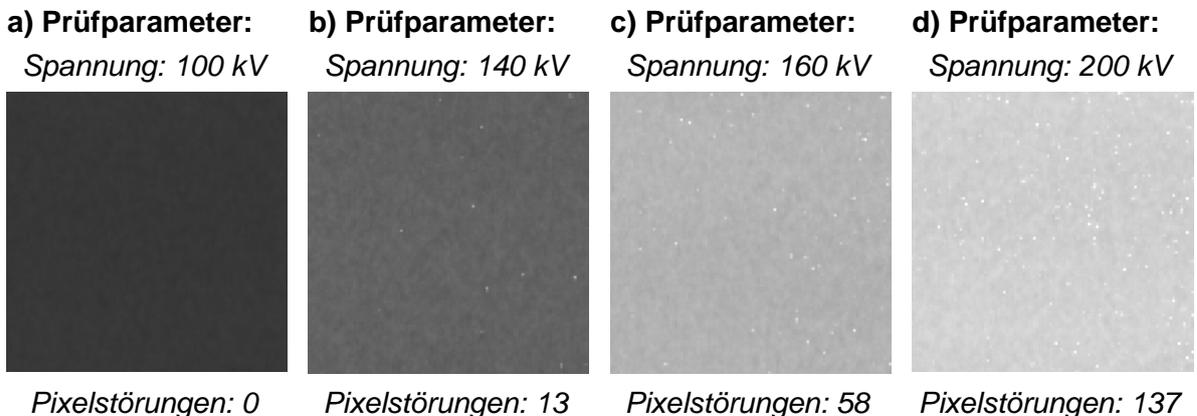


**Abbildung 3.23: Schematische Darstellung zur Erläuterung eines Cluster-Kernel-Pixels**

*Dead-Pixel* sind Pixel, die in Abhängigkeit der Strahlung zu keiner Grauwertänderung führen [9, S. 4]. Diese treten in dem linken Bildbereich der Röntgenaufnahmen auf. Dabei handelt es sich um die ersten beiden Pixel der linken Bildhälfte, wie es in Abbildung 3.22 bereits gezeigt wurde. Dabei wurde analysiert, dass der erste Pixel keine Bildinformation trägt, sondern eine automatisch hochzählende Zahl darstellt, die zur Nummerierung der Bildzeilen dient. Da es sich um 16-Bit Grauwerte handelt, können die Pixel nur Grauwerte zwischen 0 und 65.535 annehmen, sodass bei mehr als 65.535 aufgenommenen Zeilen die Nummerierung erneut bei 0 beginnt. Der zweite Pixel ist ein stark schwankender Pixelgrauwert über den gesamten Wertebereich. Da die Grauwerte bei einem nicht bestrahlten Offsetbild stark schwanken und zudem helle Grauwerte aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass diese Pixel unabhängig von der einfallenden Strahlung sind.

### 3.2.3 Störeinflüsse

Bei durchgeführten Röntgenaufnahmen treten Störeinflüsse bei einer Spannung über 120 kV auf. Anhand folgender Bilder, die bei unterschiedlichen Spannungen sowie einer Stromstärke von 3 mA aufgenommen wurden, werden die Störeinflüsse auf einer homogenen Fläche sichtbar. Dazu wird ein Teilausschnitt des Bildes mit einer Größe von 100x100 Pixel entnommen und die sichtbaren Störpixel gezählt.



**Abbildung 3.24: Pixelstörungen ohne Bleimantel bei verschiedenen Spannungen**

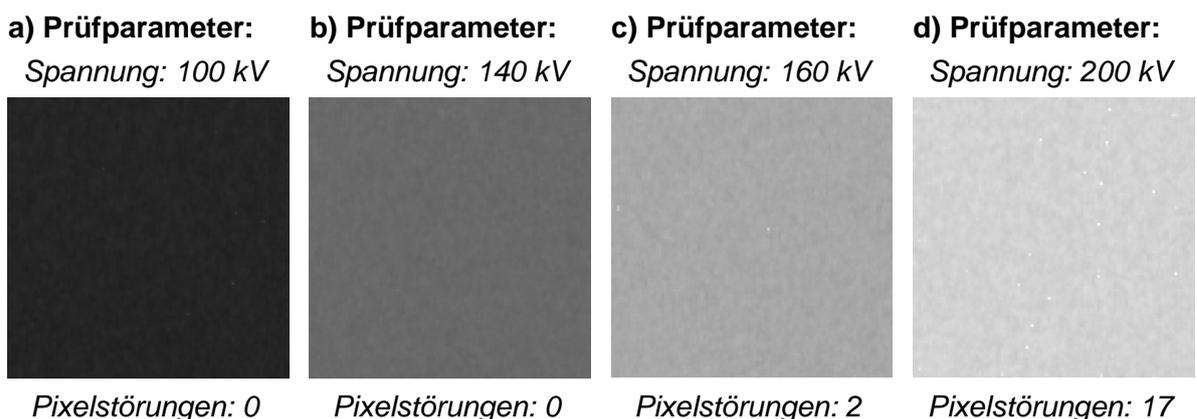
Die in Abbildung 3.24-a bis Abbildung 3.24-d sichtbaren Bildstörungen sind unerwünscht. Das Auftreten der Bildstörungen resultiert aus einer schlechten Abschirmung der Kameraelektronik vor Streustrahlung. Streustrahlung entsteht durch die Umlenkung der primären Strahlung an den Konturen des Prüfobjektes sowie an der seitlichen und rückwärtigen Umgebung der Strahlenschutzkabine [17, S. 114].

Um der Streustrahlung entgegenzuwirken, wird die TDI-Kamera mit einer 4 mm dicken Bleischicht ummantelt (siehe Abbildung 3.25). Aussparungen an den Anschlüssen und dem strahlensensiblen Detektorbereich ermöglichen den funktionsfähigen Umgang mit der Kamera.



**Abbildung 3.25: Bleiummantelung der TDI-Kamera**

Nach der Ummantelung der TDI-Kamera mit Blei werden erneut Röntgenaufnahmen mit unterschiedlichen Spannungen und einer Stromstärke von 3 mA aufgenommen. Auf Basis eines Teilausschnittes des Bildes mit einer Größe von 100x100 Pixel werden die sichtbaren Störpixel gezählt.



**Abbildung 3.26: Pixelstörungen mit Bleimantel bei verschiedenen Spannungen**

Werden die Röntgenaufnahmen aus Abbildung 3.24 und Abbildung 3.26 verglichen, ist ersichtlich, dass eine Bleiummantelung die Anzahl der Pixelstörungen deutlich minimiert.

### 3.2.4 Aufnahmegeschwindigkeit der TDI-Kamera

Um die mögliche Aufnahmegeschwindigkeit der TDI-Kamera herauszufinden, bedarf es einiger Testaufnahmen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Hierbei wurde herausgefunden, dass die maximale Aufnahmegeschwindigkeit von der Aufnahme­frequenz der Zeilenbilder abhängt. Die Aufnahme­frequenz wird mit dem Kameraparameter *Linerate* eingestellt und beträgt den voreingestellten Wert  $f_{Linerate} = 498 \text{ Hz}$ .

$$v_{TDI-Kamera} = p_{Breite} \cdot f_{Linerate} \quad (3.10)$$

Bei der vorgegebenen Pixelgröße von  $48 \mu\text{m}$  und der voreingestellten Aufnahme­frequenz der TDI-Kamera von  $f_{Linerate} = 498 \text{ Hz}$  beträgt die höchste Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera  $v_{TDI-Kamera} = 0,0239 \text{ m/s}$ .

Wird jedoch bei unveränderter Aufnahme­frequenz der Zeilen eine höhere Aufnahme­geschwindigkeit eingestellt, werden die Bildaufnahmen nicht mehr in Abhängigkeit des externen Kamerataktes aufgenommen, sondern mit der Geschwindigkeit der eingestellten Aufnahme­frequenz. Der Kameratakt wird dann vernachlässigt und führt zu verzerrten Röntgenaufnahmen. Damit der externe Kameratakt bei allen Prüfgeschwindigkeiten die Aufnahme­frequenz vorgibt, muss der Parameter *Linerate* auf den maximalen Wert von  $f_{Linerate\_max} = 22.556 \text{ Hz}$  gestellt werden.

$$v_{TDI-Kamera\_max} = p_{Breite} \cdot f_{Linerate\_max} = 48 \mu\text{m} \cdot 22.556 \text{ Hz} = 1,083 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.11)$$

Die Prüfobjekte können mit einer maximalen Bewegungsgeschwindigkeit von  $v_{TDI-Kamera\_max} = 1,083 \text{ m/s}$  geröntgt werden. Diese berechnete Geschwindigkeit ist für die kurze Linearführung des Testaufbaus jedoch deutlich zu hoch.

Die Testaufnahmen im Teststand wurden mit einer Bewegungsgeschwindigkeit von  $0,200 \text{ m/s}$  gemacht. Der Antrieb für das endgültige Röntgensystem soll daher auch für eine Bewegungsgeschwindigkeit von  $0,200 \text{ m/s}$  ausgelegt werden.

## 4 Konzeptionierung und Umsetzung des Röntgensystems

Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Teststand mit der TDI-Kamera zur Aufnahme von Röntgenbildern erläutert wurde, werden im Kapitel 4 die notwendigen Komponenten zur Konzeptionierung und Umsetzung des Röntgensystems beschrieben. Dazu gehören mechanische, elektrische sowie programmtechnische Komponenten.

### 4.1 Gesamtaufbau des Röntgensystems

Das Röntgensystem soll zur Überprüfung von Rundschweißnähten an Rohren dienen. Als Röntgendetektor kommt die TDI-Kamera zum Einsatz. Da es sich um eine Zeilenkamera handelt, muss die Rundschweißnaht in der Bewegung aufgenommen werden. Es gibt die Möglichkeit, dass das Rohr gedreht und die Schweißnaht von einer festplatzierten TDI-Kamera aufgenommen wird. Diese Variante ist jedoch nicht realisierbar, weil das Rohr bereits mit einem anderen Rohr verschweißt wurde und somit nicht gedreht werden kann. Die gewählte Variante ist es, die TDI-Kamera um das Rohr zu führen und die Rundnaht des festplatzierten Rohres aufzunehmen. Innerhalb des zu prüfenden Rohres befindet sich eine Rundstrahlröhre, die die Röntgenstrahlung im Winkel von 360° aussendet. Somit müssen die Strahlen während der Bewegung der TDI-Kamera nicht nachgeführt werden. Die TDI-Kamera wird entlang einer Bogenführung durch einen elektrischen Antrieb bewegt. Die Kommunikation zwischen dem Anwendercomputer und dem Röntgensystem ist Inhalt der Schnittstellenauslegung. Das Steuerungsprogramm dient zur Ansteuerung der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems. Damit das Röntgensystem von dem Anwender benutzerfreundlich bedient werden kann, wird eine Bedienoberfläche entwickelt. Der schematische Aufbau ist in nachfolgender Abbildung 4.1 dargestellt.

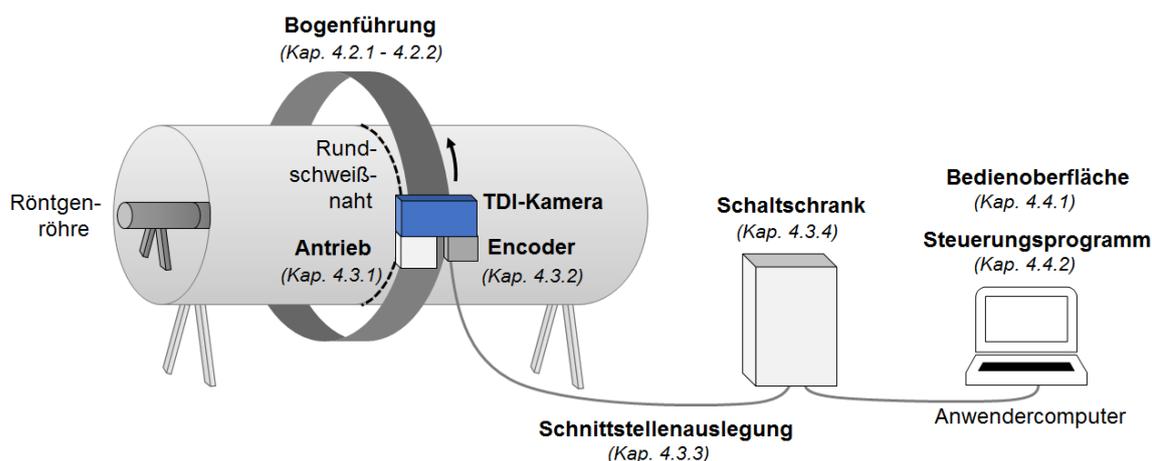


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Röntgensystems

Das final entwickelte und aufgebaute Röntgensystem ist in Abbildung 4.2 dargestellt und befindet sich in der Strahlenschutzkabine des Unternehmens X-ray Systems and Solutions GmbH in Lübeck.



**Abbildung 4.2: Aufgebautes Röntgensystem in der Strahlenschutzkabine**

In den folgenden Kapiteln wird das Röntgensystem mit seinen einzelnen Komponenten detailliert beschrieben.

## **4.2 Mechanische Konzeptionierung und Umsetzung**

Die mechanische Konzeptionierung und Umsetzung dient zur Entwicklung einer Konstruktion, auf der die TDI-Kamera und weitere notwendige Komponenten entlang der zu prüfenden Rundschweißnaht geführt werden. In den folgenden Kapiteln wird die dafür benötigte Bogenführung sowie deren Befestigung und Ausrichtung am Rohr beschrieben.

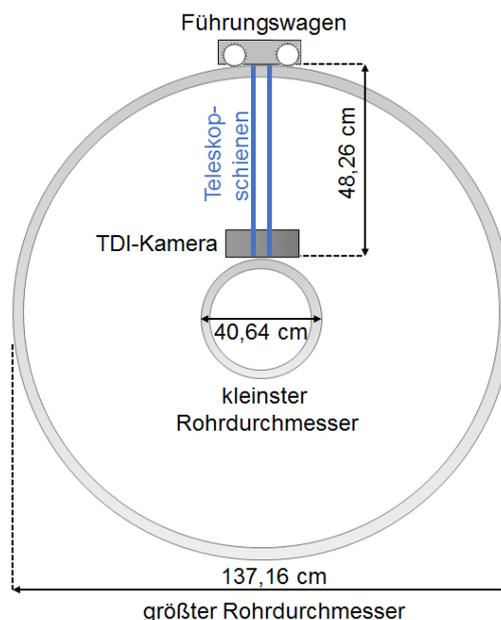
### **4.2.1 Bogenführung**

Es gibt die Vorgabe des Unternehmen X-ray Systems and Solutions GmbH eine Konstruktion zu entwickeln, mit der unterschiedliche Rohre mit einem Durchmesser von 16“ bis 54“ (40,64 cm bis 137,16 cm) prüfen zu können. Damit die TDI-Kamera um das Rohr geführt werden kann, wird eine Bogenführung benötigt. Anders als bei einer Linearführung, bei der eine lineare Bewegungsrichtung ausgeübt wird, bewirkt eine Bogenführung eine Bewegung in Drehrichtung aus. Die Bewegung der TDI-Kamera soll mithilfe eines Führungswagens realisiert werden, auf dem die TDI-Kamera fest montiert wird. Auf der Bogenführung muss sich ein Zahnkranz befinden, auf dem der Führungswagen mit Hilfe eines Zahnrads bewegt wird. Ein hinter dem Zahnrad befindlicher Antrieb muss den Führungswagen elektrisch antreiben. Die Auslegung sowie die Wahl des Motors werden in Kapitel 4.3.1 näher betrachtet. Der Führungswagen soll mit Hilfe von Rollen über die Bogenführung bewegt werden.

Damit die gewünschten Rohrdurchmesser im Bereich von 40,64 cm bis 137,16 cm geprüft werden können, muss die Bogenführung einen Minstdurchmesser von 137,16 cm auf-

weisen. Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, muss jedoch die Kamera möglichst nah an das zu prüfende Rohr positioniert werden, um die geometrische Unschärfe so gering wie möglich zu halten. Dies erfordert variabel einstellbare Teleskopschienen mit einer Mindestlänge von 48,26 cm (siehe Abbildung 4.3). Wird ein Rohr mit großen Durchmesser geröntgt, so müssen die Teleskopschienen eingefahren werden, damit sich der Abstand zwischen dem Führungswagen und der TDI-Kamera verkleinert. Wird hingegen ein Rohr mit kleinem Rohrdurchmesser – in diesem Praxisfall mit einem Durchmesser von 40,64 cm – geröntgt, so müssen die Teleskopschienen auf ihre Länge von 48,26 cm ausgefahren werden. Angesichts der Bewegung der TDI-Kamera könnte dies jedoch zu Schwingungen führen, die die Bildqualität der Rundnaht möglicherweise verschlechtern.

$$l_{\text{Teleskopschiene}} = \frac{d_{\text{Bogenführung}} - d_{\text{Rohr}}}{2} = \frac{137,16 \text{ cm} - 40,64 \text{ cm}}{2} = 48,26 \text{ cm} \quad (4.1)$$



**Abbildung 4.3: Anpassung der Teleskopschienenlänge an den Rohrdurchmesser**

Da das Unternehmen X-ray Systems and Solutions GmbH bislang noch keine Erfahrungen mit Bogenführungen sowie auch mit Rohrprüfanlagen, bei denen die Kamera bzw. der Detektor um das Rohr geführt wird, sammeln konnte, werden die unterschiedlichen Rohrdurchmesser auf drei verschiedene Größen von Bogenführungen aufgeteilt. Vorrangig geht es um die Prüfung der Machbarkeit eines solchen Röntgensystems sowie dem Einsatz der TDI-Kamera gegenüber konventionellen Röntgenmethoden.

Betrachtet man die unterschiedlichen Rohrdurchmesser, kann der daraus zu prüfende Größenbereich für dieses Röntgensystem berechnet werden. Dieser berechnet sich nach der Formel 4.2.

$$d_{\text{Bereich}} = d_{\text{Rohr}_{\text{gro\ss}}} - d_{\text{Rohr}_{\text{klein}}} = 137,16 \text{ cm} - 40,64 \text{ cm} = 96,52 \text{ cm} \quad (4.2)$$

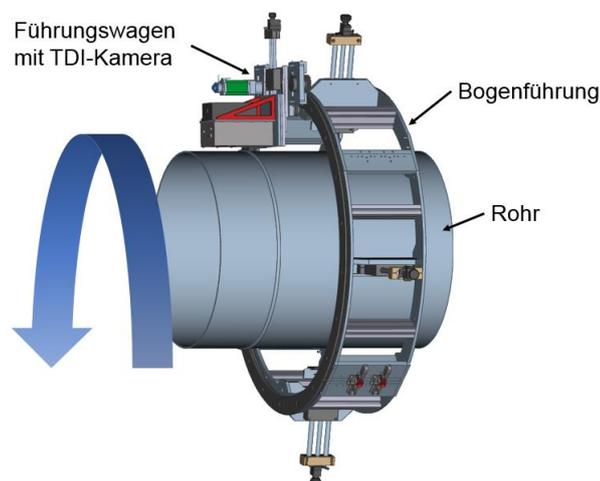
Das Röntgensystem muss einen Größenbereich von 96,52 cm abdecken können. Aufgrund der Anforderung unterschiedliche Rohrdurchmesser prüfen zu können, werden Größenbereiche der zu prüfenden Rohre festgelegt (siehe Tabelle 4.1).

**Tabelle 4.1: Aufteilung der Rohrdurchmesser auf drei Bogenführungen**

Rohrdurchmesser	kleinste Bogenführung	mittlere Bogenführung	größte Bogenführung
von	40,64 cm	72,82 cm	105,00 cm
bis	72,82 cm	105,00 cm	137,16 cm

Ziel im Rahmen dieser Prototypentwicklung ist es, eine Konstruktion für einen der drei Größenbereiche zu wählen und zu entwickeln. Dabei traf die Entscheidung auf die mittelgroße Bogenführung, mit der die Rohrdurchmesser in dem Bereich von 72,82 cm bis 105,00 cm geprüft werden können.

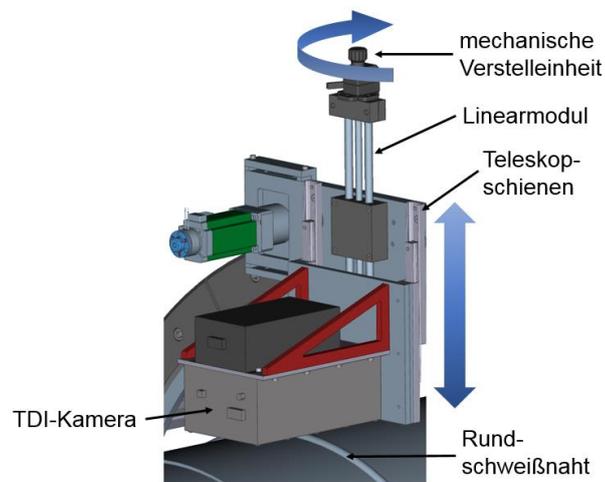
Zur Umsetzung der mechanischen Konstruktion zur Führung der TDI-Kamera wurde eine Bogenführung des Unternehmens *HepcoMotion* gewählt. Diese besitzt einen Durchmesser von 126,70 cm, sodass die Bogenführung auch bei dem größten Rohrdurchmesser von 105,00 cm um das Rohr gelegt werden kann. Mit Hilfe eines Zahnrades sowie dem auf der Bogenführung befindlichen Zahnkranz wird der Führungswagen mit der fest montierten TDI-Kamera um das Rohr bewegt (siehe Abbildung 4.4).



**Abbildung 4.4: Bewegung des Führungswagens auf der Bogenführung**

Die TDI-Kamera wird über einen spindelgetriebenes Linearmodul mit einer mechanischen Verstelleinheit so positioniert, dass sich die Kamera möglichst dicht an dem zu prüfenden Rohr befindet. Abbildung 4.5 zeigt die Positionierung der TDI-Kamera mit Hilfe der

mechanischen Verstelleinheit. Je nach Durchmesser des zu prüfenden Rohres werden die Längen der zwei Teleskopschienen angepasst.



**Abbildung 4.5: Positionierung der TDI-Kamera mit Hilfe der Verstelleinheit**

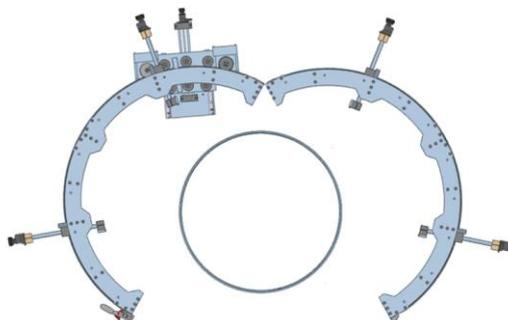
Bei Aufteilung auf drei verschiedene Bogenführungen berechnet sich die Mindestlänge der Teleskopschienen nach Formel 4.3.

$$l_{\text{Teleskopschiene}}(n_{\text{Bogenführung}}) = \frac{d_{\text{Bereich}}}{n_{\text{Bogenführung}} \cdot 2} = \frac{96,52 \text{ cm}}{3 \cdot 2} = 16,09 \text{ cm} \quad (4.3)$$

Da Teleskopschienen mit der Länge von 16,09 cm nicht als Standardprodukt verfügbar sind, werden Teleskopschienen mit einer Länge von 20 cm für das zu entwickelnde Röntgensystem gewählt.

#### 4.2.2 Befestigung und Ausrichtung der Bogenführung

Bei der Befestigung der Bogenführung auf dem Rohr ist zu beachten, dass die Rohre über Rundschweißnähte miteinander verschweißt sind. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Bogenführung öffnen zu können. Die Bogenführung kann aus zwei 180° Bögen bestehen, die voneinander getrennt werden können (siehe Abbildung 4.6).

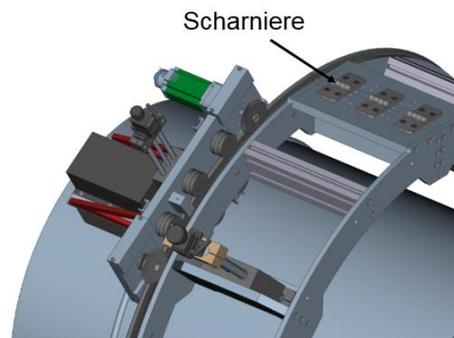


**Abbildung 4.6: Öffnung der Bogenführung**

Zwei Schnellverschlüsse an der Unterseite der Bogenführung dienen zur Öffnung der zwei Hälften (siehe Abbildung 4.7). An der Oberseite der Bogenführung befinden sich drei Scharniere, die die zwei bewegten Hälften der Bogenführung beweglich miteinander verbindet (siehe Abbildung 4.8). Sobald der entsprechende Öffnungswinkel erreicht ist, kann die Konstruktion um das zu prüfende Rohr herumgelegt werden.

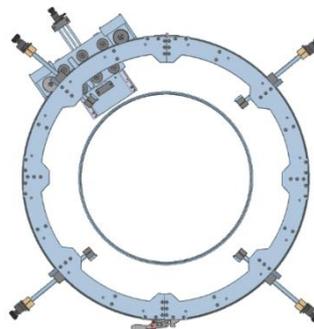


**Abbildung 4.7: Unterseite der Bogenführung zur Darstellung der Schnellverschlüsse**



**Abbildung 4.8: Oberseite der Bogenführung zur Darstellung der Scharniere**

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, muss die TDI-Kamera möglichst nah an das Rohr positioniert werden. Dies hat jedoch den Nachteil, dass der Abstand zwischen der Kamera und dem Rohr während einer Umfahrung des Rohres möglichst gleichbleibend sein muss, um keine Vergrößerungsunterschiede in den Bildaufnahmen zu erhalten. Zudem darf die Kamera während einer Umfahrung keinesfalls das Rohr berühren, da dieses zu Beschädigungen am Rohr sowie auch an der TDI-Kamera führen könnte. Um den symmetrischen Abstand zwischen Rohr und Kamera einhalten zu können, muss die Bogenführung gleichmäßig auf das Rohr aufgesetzt werden. Dazu sind in einem Abstand von 90° um die Bogenführung herum vier Klemmblocke verbaut (siehe Abbildung 4.9).



**Abbildung 4.9: Anordnung der vier Klemmblocke an der Bogenführung**

Diese vier Klemmenblöcke dienen zur symmetrischen Ausrichtung der Bogenführung auf das Rohr. Über einen Spindeltrieb werden die Klemmblocke an den zu prüfenden Rohrdurchmesser angepasst. Die einstellbare Länge des Spindeltriebes beträgt 20 cm.

Um die manuelle Feinjustierung der Konstruktion zu ermöglichen, wird mit Hilfe von analogen Anzeigeeinheiten die ausgefahrene Länge der Klemmblöcke dargestellt.

### 4.3 Elektrische Konzeptionierung und Umsetzung

Die elektrische Konzeptionierung und Umsetzung beinhaltet die Berechnung und Auswahl des benötigten Antriebes zur Umfahrung der TDI-Kamera um das Rohr. Zusätzlich wird eine optimierte Synchronisierung der Aufnahmegeschwindigkeit mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Führungswagens für das zu entwickelte Röntgensystem im Vergleich zum Teststand entwickelt. Abschließend werden die benötigten Komponenten des Schaltschrankes sowie die Schnittstellen der elektrischen Komponenten beschrieben.

#### 4.3.1 Antriebsauslegung

Damit die TDI-Kamera um das zu prüfende Rohr fahren kann, wird ein elektrischer Antrieb benötigt. Dieser muss für das Gewicht des Führungswagens sowie dessen einwirkende Kräfte ausgelegt werden. Die Antriebsauslegung umfasst mehrere Schritte, die anhand folgender Abbildung 4.10 erläutert werden.

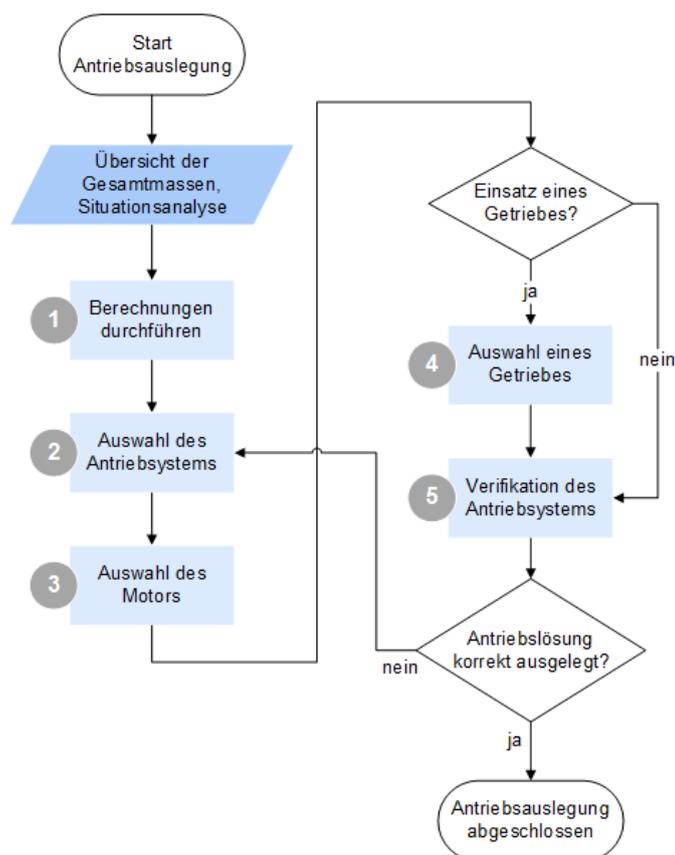


Abbildung 4.10: Ablauf der Antriebsauslegung

### 1 Berechnungen durchführen

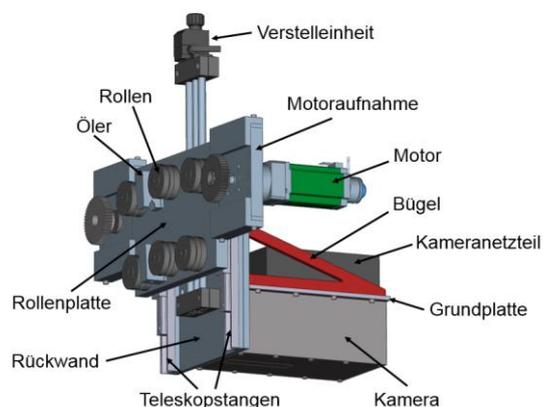
Um das benötigte Antriebssystem zu ermitteln, müssen Berechnungen über die zu benötigten Drehmomente durchgeführt werden. Da der Motor und die dazugehörigen Anschlusskabel erst später ausgewählt werden, gehen die Gewichtsmassen des Motors sowie der Anschlusskabel mit einer geschätzten Gesamtmasse von 3 Kg in die Berechnung mit ein.

Die Gewichtsmassen der zu bewegenden Bauteile sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

**Tabelle 4.2: Gewichte der Bauteile auf dem Führungswagen**

Bauteile	Gewicht [kg]
Kamera inkl. Bleiummantelung	12,700
Kameranetzteil	0,900
Motor (geschätzt)	1,500
Anschlusskabel (geschätzt)	1,500
Gestell des Führungswagens	7,775
bestehend aus:	
Bügel	0,454
Grundplatte	0,746
Rückwand	0,512
Teleskopstangen	1,586
Verstelleinheit	0,500
Rollen	0,540
Rollenplatte	3,129
Öler	0,160
Motoraufnahme	0,148

Der Führungswagen mit seinen einzelnen Bauteilen ist in Abbildung 4.11 grafisch dargestellt.



**Abbildung 4.11: Darstellung der Bauteile an dem Führungswagen**

Das Gewicht des Führungswagens berechnet sich durch die Addition der in Abbildung 4.11 dargestellten Bauteile mit der Formel 4.4.

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Führungswagen}} &= m_{\text{Bügel}} + m_{\text{Grundplatte}} + m_{\text{Rückwand}} + m_{\text{Teleskopschienen}} + \\
 & m_{\text{Verstelleinheit}} + m_{\text{Rollen}} + m_{\text{Rollenplatte}} + m_{\text{öler}} + m_{\text{Motoraufnahme}} + m_{\text{Kamera}} + \\
 & m_{\text{Kameranetzteil}} + m_{\text{Motor(geschätzt)}} + m_{\text{Anschlusskabel(geschätzt)}} = 24,375 \text{ Kg}
 \end{aligned}
 \quad (4.4)$$

Anhand der ermittelten Werte werden die einwirkenden Kräfte und die benötigten Drehmomente für den Antrieb berechnet. Da die Rundschweißnaht geprüft werden soll, muss der Führungswagen auf der Bogenführung das gesamte Rohr umfahren können. Im mikroskopischen Wegintervall beschreibt der Führungswagen eine geradlinige (translatorische) Bewegung. In Abhängigkeit des Steigungswinkels  $\alpha$  verändern sich die auf den Führungswagen einwirkenden Kräfte: Normalkraft  $F_N$ , Rollreibungskraft  $F_R$  sowie die Hangabtriebskraft  $F_H$ . Um den Antrieb korrekt dimensionieren zu können, müssen alle Steigungswinkel der Bogenführung betrachtet werden. Abbildung 4.12 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

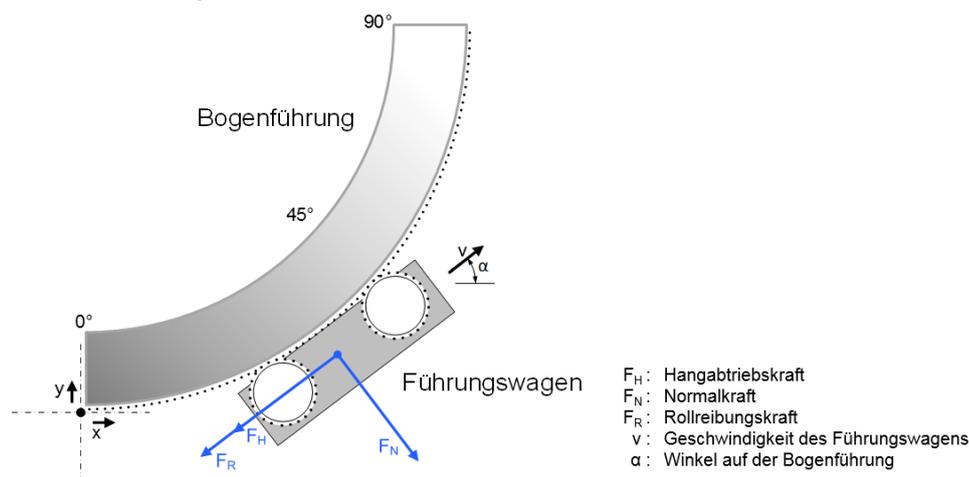


Abbildung 4.12: Einwirkende Kräfte auf den Führungswagen

Mit Hilfe der folgenden Formeln werden die auf den Führungswagen wirkende Normalkraft  $F_N$ , Rollreibungskraft  $F_R$  sowie die Hangabtriebskraft  $F_H$  berechnet [37, S. 9].

$$F_N(\alpha) = m_{\text{Führungswagen}} \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (4.5)$$

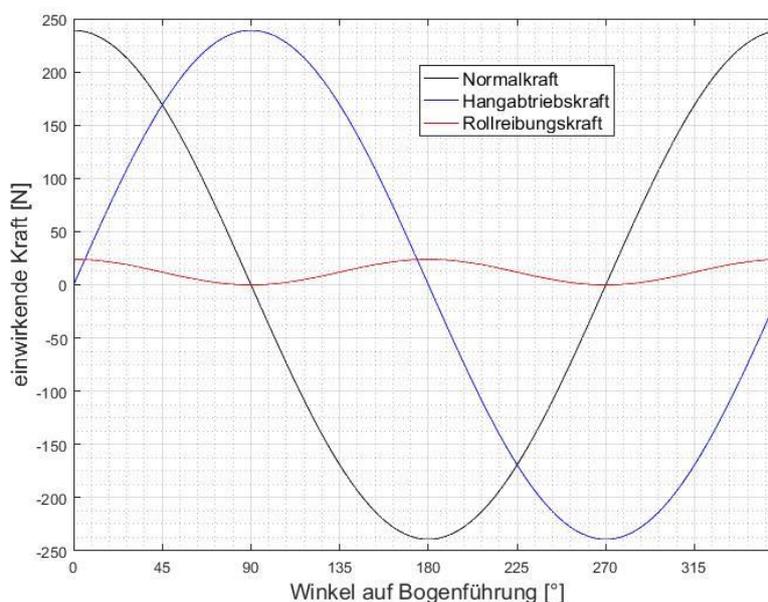
$$F_H(\alpha) = m_{\text{Führungswagen}} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

Die Reibung gehört bei der Antriebsauslegung zu den sogenannten „weichen“ Faktoren. Eine zu betrachtende Reibung entsteht durch die am Führungswagen befestigten Rollen. Über diese Rollen wird der Führungswagen entlang der Bogenführung bewegt. Häufig sind die Reibwerte der Bauteile nicht genau bekannt und müssen abgeschätzt werden. In

der Praxis werden die Reibverhältnisse der zu bewegenden Bauteile etwas höher angesetzt, um genügend Sicherheit bei der Berechnung zu haben [8, S. 176]. Die Rollen besitzen einen Reibwert von  $\mu = 0,08$  bis  $0,1$  [8, S. 80]. Für das Röntgensystem wird daher ein Reibkoeffizient von  $\mu_{\text{Reib}}$  von  $0,1$  angenommen. Die Berechnung der Rollreibungskraft  $F_R$  erfolgt durch das Produkt der Normalkraft und dem Reibkoeffizienten  $\mu_{\text{Reib}}$  [5, S. 113].

$$F_R(\alpha) = F_N(\alpha) \cdot \mu_{\text{Reib}} \quad (4.7)$$

Nach der Kräfteberechnung werden diese auf einer Kennliniengrafik dargestellt (siehe Abbildung 4.13).



**Abbildung 4.13: Auf den Führungswagen einwirkende Kräfte**

Die Hangabtriebskraft ist in dem Bereich von  $1^\circ$  bis  $179^\circ$  positiv, da diese gegen die Bewegungsrichtung wirkt. Bei den Punkten  $0^\circ$  sowie  $180^\circ$  ist keine Steigung vorhanden, so dass keine Hangabtriebskraft in horizontaler Lage des Führungswagens auftritt. Im Bereich von  $181^\circ$  bis  $359^\circ$  wirkt die Hangabtriebskraft in die Bewegungsrichtung des Führungswagens. Dies hat zur Folge, dass die Pfeilrichtung der Kraft sich umkehrt und als negative Kraft wirkt. Die Normalkraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung nach unten gerichtet ist, wirkt in den Bereichen von  $0^\circ$  bis  $89^\circ$  sowie von  $271^\circ$  bis  $359^\circ$  positiv. Ab einem Winkel von  $91^\circ$  bis  $269^\circ$  kehrt sich die Kraft um und wird folglich als negative Kraft dargestellt. An den Punkten  $90^\circ$  und  $270^\circ$  wirkt keine Normalkraft, da der Führungswagen senkrecht steht und somit keine Kraftausübung in orthogonaler Richtung wirkt. Die Rollreibungskraft ist abhängig von der Normalkraft und wirkt der Bewegungsrichtung des Führungswagens entgegen.

Mit Hilfe der Hangabtriebskraft  $F_H$  und der Rollreibungskraft  $F_R$  wird das an dem Zahnrad wirksame Drehmoment  $M_L$  der linear bewegten Masse berechnet.

$$M_L(\alpha) = r_{\text{Zahnrad}} \cdot (F_H(\alpha) + F_R(\alpha)) \quad (4.8)$$

Der Führungswagen erfährt während der konstanten Beschleunigung sowie der konstanten Verzögerung einen Einfluss des Trägheitsmoments der linear bewegten Masse  $J_L$ . Das zu überwindende Trägheitsmoments  $J_L$  ist abhängig von der Masse des Führungswagens  $m_{\text{Führungswagen}}$  und berechnet sich wie folgt [35, S. 1]:

$$J_L = m_{\text{Führungswagen}} \cdot r_{\text{Zahnrad}}^2 \quad (4.9)$$

Das Trägheitsmoment  $J_L$  wirkt der Beschleunigung entgegen und muss zusätzlich zu dem Drehmoment der linear bewegten Masse  $M_L$  hinzuaddiert werden. Sobald das Trägheitsmoment überwunden wird, bewegt sich der Führungswagen. Für die Beschleunigung auf eine Änderungsgeschwindigkeit  $\Delta v_L$  von 20 cm/s (siehe Kapitel 3.2.4) wird eine Zeit  $\Delta t$  von 0,5 s angenommen.

$$M_{\text{Beschleunigung}}(\alpha) = M_L(\alpha) + J_L \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta v_L / (2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Zahnrad}})}{\Delta t} \quad (4.10)$$

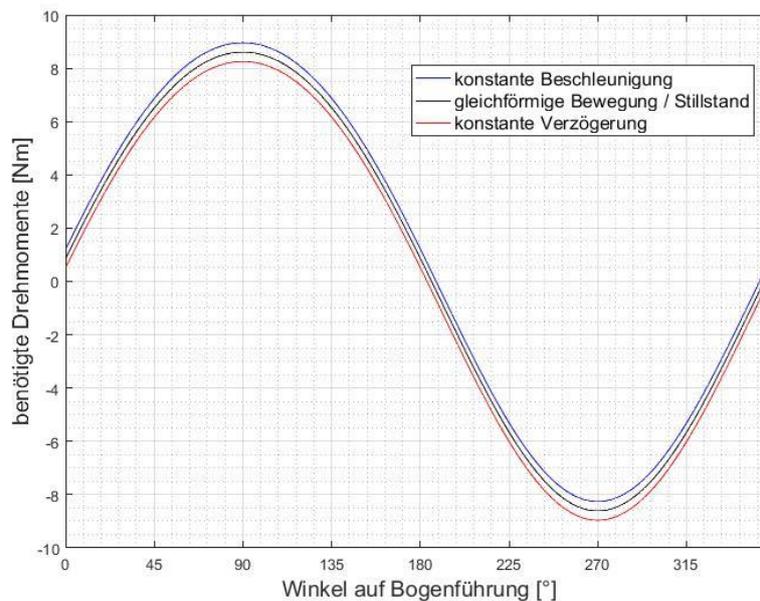
Bei der konstanten Verzögerung unterstützt das Trägheitsmoment den Bremsvorgang. Somit muss ein geringeres Drehmoment aufgebracht werden, um den Führungswagen abzubremesen. Die Verzögerung des Führungswagens soll auch innerhalb einer Zeit  $\Delta t$  von 0,5 s von einer Geschwindigkeit  $v_L$  von 20 cm/s zum Stillstand gebracht werden. Die Änderungsgeschwindigkeit  $\Delta v_L$  beträgt demnach 20 cm/s.

$$M_{\text{Verzögerung}}(\alpha) = M_L(\alpha) - J_L \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta v_L / (2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Zahnrad}})}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Beim Stillstand sowie auch bei der gleichförmigen Bewegung des Führungswagens muss ausschließlich das Drehmoment der linearbewegten Masse  $M_L$  aufgebracht werden.

$$M_{\text{Stillstand}}(\alpha) = M_{\text{gleichförmige Bewegung}}(\alpha) = M_L(\alpha) \quad (4.12)$$

Werden alle in Abhängigkeit des Steigungswinkels berechneten Drehmomente in einer Kennliniengrafik dargestellt, werden Unterschiede deutlich (siehe Abbildung 4.14).



**Abbildung 4.14: Benötigte Drehmomente für den Führungswagen (Abtriebsseite)**

In der Aufwärtsbewegung (von  $1^\circ$  bis  $179^\circ$ ) muss der Führungswagen angetrieben werden, sodass der Motor ein positives Drehmoment aufbringen muss. In der Abwärtsbewegung (von  $181^\circ$  bis  $359^\circ$ ) muss jedoch ein Gegenmoment aufgebracht werden, damit der Führungswagen in dem Neigungswinkel mit gleichmäßiger Geschwindigkeit betrieben werden kann. Dieses Moment wird negativ auf der Kennliniengrafik dargestellt.

Vergleicht man die konstante Beschleunigung mit der konstanten Verzögerung ist erkennbar, dass während der Aufwärtsbewegung ein größeres Drehmoment für die konstante Beschleunigung aufgebracht werden muss, als bei der konstanten Verzögerung. Grund hierfür ist die zusätzlich wirkende Hangabtriebskraft und die Rollreibungskraft, die bei der Beschleunigung aufgebracht werden muss. In der Abwärtsfahrt (von  $181^\circ$  bis  $359^\circ$ ) muss jedoch ein größeres Gegenmoment für die konstante Verzögerung aufgebracht werden, als bei der konstanten Beschleunigung. Dies liegt an der negativ wirkenden Hangabtriebskraft, die zusätzlich den Führungswagen während der konstanten Beschleunigung unterstützt.

Wie in Abbildung 4.14 ersichtlich, soll das maximal vom Motor aufzubringende Drehmoment  $8,96 \text{ Nm}$  betragen. Dieses Drehmoment muss bei der Beschleunigung des Führungswagens in einem Steigungswinkel von  $90^\circ$  aufgebracht werden und soll in die Berechnung der Antriebsauslegung mit einfließen. Zusätzlich soll eine Drehmomentreserve von  $50\%$  in der Berechnung berücksichtigt werden.

Der zu wählende Motor für das Röntgensystem muss gemäß der Formel 4.13 ein Drehmoment von mindestens  $13,44 \text{ Nm}$  aufbringen können.

$$M_{min} = 1,5 \cdot 8,96 \text{ Nm} = 13,44 \text{ Nm} \quad (4.13)$$

Nachdem das benötigte Drehmoment berechnet wurde, können weitere Aspekte zur Wahl des geeigneten Motors definiert werden.

## 2 Auswahl des Antriebssystems

Das Antriebssystem muss den Führungswagen und die darauf befestigten TDI-Kamera mit kurzen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen sowie auch mit einer hohen Positioniergenauigkeit über das zu prüfende Rohr bewegen. Zusätzlich soll das Röntgensystem mobil genutzt werden, sodass das Antriebssystem nicht allzu schwer und baulich zu groß sein darf. Zudem sollen die einmaligen Anschaffungskosten sowie auch die permanenten Wartungs- und Instandsetzungskosten berücksichtigt werden.

Nachdem die Anforderungen an das Antriebssystem gestellt sind, kann mit der Wahl des Antriebssystems begonnen werden. Hierbei traf die Entscheidung auf einen Servoantrieb. Dieser ist aufgrund seines geringen Trägheitsmoments für hohe Spitzendrehmomente ausgelegt. Ein Stellgerät, welches die erforderlichen Ströme für den Drehmomentaufbau dynamisch in die Motorwicklungen einprägt, ist für diese hohen Spitzendrehmomente verantwortlich. Zusätzlich sind Servoantriebe sogenannte 4-Quadranten-Antriebe, mit denen in beide Richtungen motorisch beschleunigt und generatorisch gebremst werden kann. [22, S. 126ff.]

Ein solcher Betrieb ist notwendig, da wie in Abbildung 4.14 ersichtlich, ein positives und negatives Drehmoment aufgebracht werden muss.

Für die Bewegung des Führungswagens wird ein Servoantrieb mit Schrittmotor ausgewählt, da dieser in den Anschaffungskosten deutlich günstiger als andere Antriebssysteme ist und zudem die gewünschten Anforderungen erfüllt. Zusätzlich sind Schrittmotoren wartungsfrei, weil die Wicklungen im Ständer und nicht im Läufer untergebracht sind. Folgekosten für Bürsten fallen daher nicht an. [22, S. 187ff.]

Für die Steuerung des Schrittmotors wird ein Stellgerät benötigt. Dieses steuert den Schrittmotor mit einer Folge von Stromimpulsen an, sodass der Motor eine Drehbewegung um einen definierten Winkelschritt ausübt. Die Vorgabe der auszuführenden Winkelschritte erfolgt durch die überlagerte Bewegungssteuerung. Dazu übergibt die Bewegungssteuerung den Positionssollwert inkrementell als Impulsfolge an das Stellgerät, welches im Anschluss die erforderlichen Stromimpulse für den Schrittmotor erzeugt. [22, S. 187]

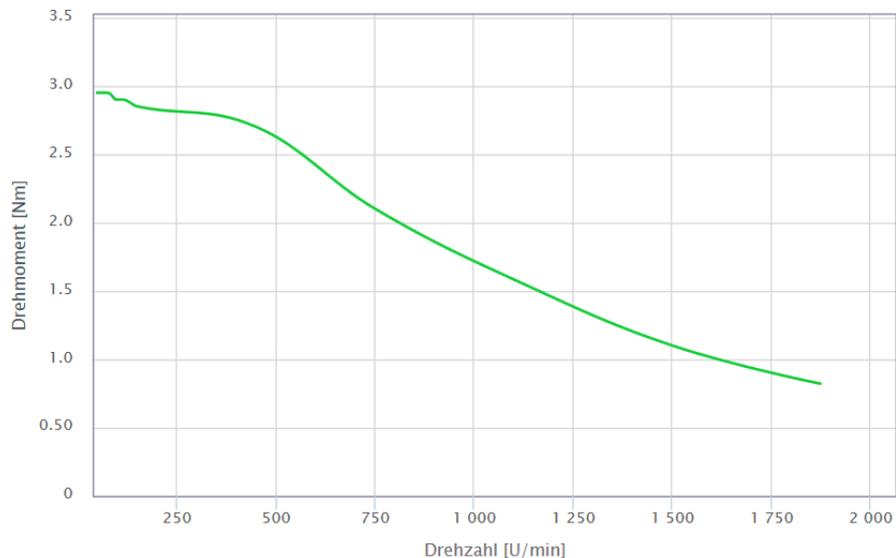
## 3 Auswahl des Motors

Gewählt wird der Schrittmotor *ST6018D4508-B* des Herstellers Nanotec, der in Abbildung 4.15 dargestellt wird. Dieser besitzt ein Haltemoment  $M_H$  von 2,83 Nm [38].



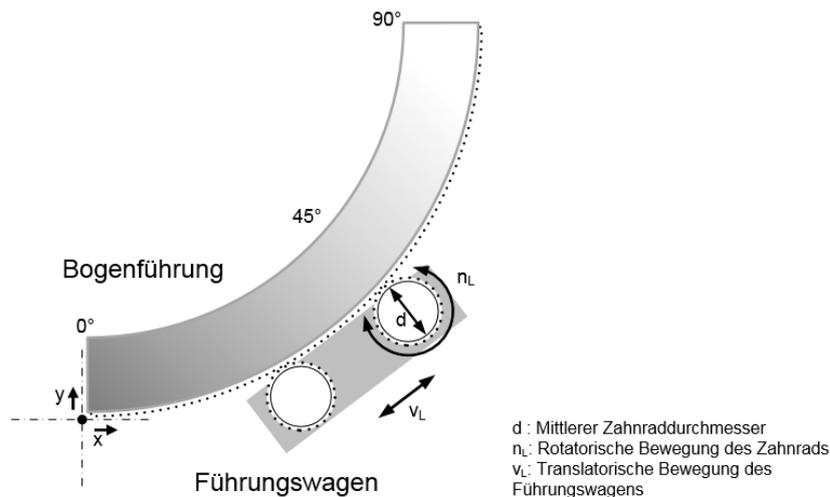
**Abbildung 4.15: Schrittmotor ST6018D4508-B [38]**

Bei einer Drehzahl von 500 U/min kann der Schrittmotor ein Nenndrehmoment von ca. 2,6 Nm aufbringen (siehe Abbildung 4.16). Bei Drehzahlen über 500 U/min sinkt das Drehmoment fast linear ab. Es muss geprüft werden, in welchem Drehzahlbereich der Schrittmotor in der Praxis betrieben werden muss, um eine Aussage treffen zu können, welches Drehmoment der Motor bei der gewünschten Geschwindigkeit von 20 cm/s aufbringen kann.



**Abbildung 4.16: Drehmoment des Schrittmotors in Abhängigkeit der Drehzahl [38]**

Die Vortriebsgeschwindigkeit  $v_L$  des Führungswagens soll 20 cm/s betragen. Die Drehzahl des Schrittmotors  $n_L$  muss bezogen auf den mittleren Durchmesser des Zahnrades sowie auf die gewünschte Vortriebsgeschwindigkeit des Führungswagens berechnet werden. Die Abbildung 4.17 zeigt die Darstellung der translatorischen zur rotatorischen Bewegung.



**Abbildung 4.17: Umwandlung der translatorischen zur rotatorischen Bewegung**

Die Umrechnung der translatorischen zur rotatorischen Bewegung wird mit folgender Formel berechnet [37, S. 15].

$$v_L = n_L \cdot \pi \cdot d \quad (4.14)$$

Die berechnete Drehgeschwindigkeit des Zahnrads  $n_L$  ergibt sich aus der Formel 4.15.

$$n_L = \frac{v_L}{\pi \cdot d} = \frac{20 \text{ cm/s}}{\pi \cdot 7,35 \text{ cm}} = 0,87 \frac{1}{s} = 51,97 \frac{1}{\text{min}} \quad (4.15)$$

Bei einer Vortriebsgeschwindigkeit  $v_L$  des Führungswagens von 20 cm/s und einem mittleren Durchmesser des Zahnrads  $d$  von 7,35 cm beträgt die Drehzahl des Zahnrades  $n_L$  51,97  $1/\text{min}$ , die folglich auch die Drehzahl des Schrittmotors darstellt. Aus Abbildung 4.16 ist ersichtlich, dass der ausgesuchte Schrittmotor *ST6018D4508-B* bei einer Drehzahl von 51,97  $1/\text{min}$  ein Drehmoment von circa 2,8 Nm aufbringen kann.

Wie zuvor in der Antriebsauslegung berechnet (siehe Formel 4.13), wird für das Antriebssystem ein Drehmoment von 13,44 Nm benötigt. Aufgrund des maximal aufzubringenden Drehmoments des ausgewählten Motors von 2,8 Nm wird ein zwischengeschaltetes Getriebe benötigt, das das motorseitige Drehmoment auf die Arbeitsmaschine anpasst. Zur Auswahl des benötigten Getriebes wird das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_G$  zwischen dem Führungswagen und dem Motor berechnet. [22, S. 353]

$$\ddot{u}_G = \frac{M_{\text{Abtrieb}}}{M_{\text{Antrieb}}} = \frac{13,44 \text{ Nm}}{2,8 \text{ Nm}} = 4,8 \quad (4.16)$$

#### 4 Auswahl des Getriebes

Der ausgewählte Schrittmotor benötigt ein Getriebe mit einem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_G$  von mindestens 4,8. Für die Umsetzung des Röntgensystems wird das Getriebe *GPLE60-1S-8* gewählt. Es handelt sich hierbei um ein Planetengetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis von 8. Die Wahl dieses Getriebes wird gestärkt durch einen hohen Wirkungsgrad  $\eta_G$  von 97 % und dem geringen Trägheitsmoment  $J_G$  von 6,5 kg mm<sup>2</sup> [39].

Aus Sicherheitsgründen ist es notwendig, eine Sicherheitsbremse einzubauen. Diese stoppt den Führungswagen bei Spannungsverlust der Anlage. Hierzu wird die Sicherheitsbremse *Brake-BKE-2,0-6,35* mit einem Haltemoment von 2 Nm ausgewählt [40]. Aufgrund des Getriebes mit einem Übersetzungsverhältnis von 8 erhöht sich das Haltemoment von 2 Nm auf 16 Nm und liegt so über dem benötigten Drehmoment von 13,44 Nm. In diesem Fall kann die Bremse den Führungswagen jederzeit bei einem Spannungsverlust halten.

Ein an der Welle angeschlossener 3-Kanal-Encoder dient der automatischen Fehlerkorrektur. Diese Korrektur tritt ein, falls Schritte während der Positionierung verloren gehen. Eine solcher Schrittverlust kann auftreten, wenn der Antrieb zu stark beschleunigt oder belastet wird [22, S. 188].

In Abbildung 4.18 bis Abbildung 4.20 sind die gewählten Bauteile dargestellt.



**Abbildung 4.18: Planetengetriebe**  
*GPLE60-1S-8* [39]



**Abbildung 4.19: Sicherheitsbremse**  
*Brake-BKE-2,0-6,35* [40]



**Abbildung 4.20: 3-Kanal-Encoder**  
*WEDL5541-A06* [41]

#### 5 Verifikation des Antriebssystems

Nachdem die Bauteile für das Antriebssystem ausgewählt wurden, müssen die Trägheitsmomente des Motors  $J_M$ , des Getriebes  $J_G$  sowie auch der Wirkungsgrad des Getriebes  $\eta_G$  in die Berechnung mit einbezogen werden. Zusätzlich wird das geschätzte Gewicht für den Motor von 1,5 kg in das tatsächliche Gewicht geändert und die zusätzlichen Gewichte für das Getriebe, der Bremse und den Encoder in die Berechnung mit aufgenommen.

**Tabelle 4.3: Tatsächliche Gewichte des Antriebssystems**

Bauteile	Gewicht [kg]
Schrittmotor <i>ST6018D4508-B</i>	1,900
Planetengetriebe <i>GPLE60-1S-8</i>	0,900
Sicherheitsbremse <i>Brake-BKE-2,0-6,35</i>	0,185
3-Kanal-Encoder <i>WEDL5541-A06</i>	0,070

Nach Ersetzung der geschätzten durch die tatsächlichen Gewichte des Antriebssystems sind weitere Berechnungen notwendig. Mit diesen Berechnungen soll bewiesen werden, ob das ausgewählte System korrekt ausgelegt ist. Im Folgenden werden die auf der Abtriebsseite benötigten Drehmomente auf die Antriebsseite umgerechnet.

Dabei wird das Drehmoment der linearbewegten Masse  $M'_L$  in Abhängigkeit des Steigungswinkels  $\alpha$  sowie das zu überwindende Trägheitsmoment  $J'_L$  des Zahnrades auf die Antriebsseite umgerechnet. Zusätzlich werden das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_G$  sowie der Wirkungsgrad des Getriebes  $\eta_G$  mitberücksichtigt. [34, S. 2]

$$M'_L(\alpha) = \frac{\ddot{u}_G \cdot M_L(\alpha)}{\eta_G} \quad (4.17)$$

$$J'_L = \frac{\ddot{u}_G^2 \cdot J_L}{\eta_G} \quad (4.18)$$

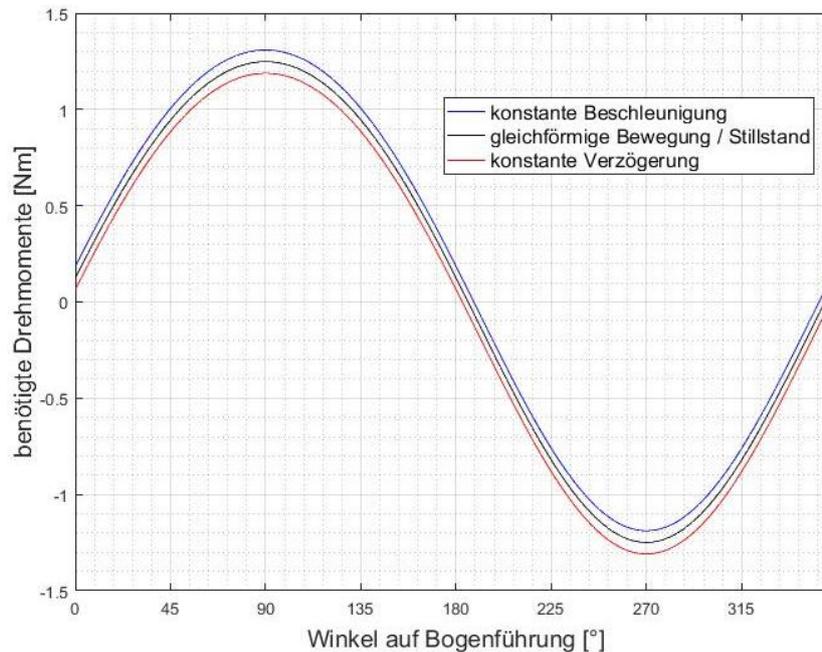
Nachdem das Drehmoment und das Trägheitsmoment auf die Antriebsseite umgerechnet wurden, werden die vom Motor aufzubringenden Drehmomente berechnet. Hierbei fließen das Trägheitsmoment des Schrittmotors  $J_M$ , das umgerechnete Trägheitsmoment  $J'_L$  und Drehmoment der linear bewegten Masse  $M'_L$  in die Berechnung mit ein. [34, S. 2f.]

$$M_{M\_Beschleunigung}(\alpha) = M'_L(\alpha) + (J_M + J_G + J'_L) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta n_L}{\Delta t} \quad (4.19)$$

$$M_{M\_Verzögerung}(\alpha) = M'_L(\alpha) - (J_M + J_G + J'_L) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta n_L}{\Delta t} \quad (4.20)$$

$$M_{M\_Stillstand}(\alpha) = M_{M\_gleichförmige\_Bewegung}(\alpha) = M'_L(\alpha) \quad (4.21)$$

Die Abbildung 4.21 zeigt die benötigten Drehmomente der Antriebsseite für die konstante Beschleunigung, konstante Verzögerung sowie der gleichförmigen Bewegung bzw. Stillstand für alle Steigungs- und Neigungswinkel.



**Abbildung 4.21: Benötigte Drehmomente für den Schrittmotor (Antriebsseite)**

Das höchste vom Schrittmotor abverlangte Drehmoment wird zum Zeitpunkt der Beschleunigung bei einem Steigungswinkel von  $90^\circ$  benötigt. Der Schrittmotor wird daher auf Grundlage der konstanten Beschleunigung zum Zeitpunkt bei einer Steigung von  $90^\circ$  ausgelegt. Dieses beträgt 1,3 Nm und entspricht mit der Drehmomentreserve von zusätzlichen 50% einem benötigten Drehmoment von 1,95 Nm.

Der gewählte Schrittmotor kann für die gewünschte Geschwindigkeit ein maximales Drehmoment von 2,8 Nm aufbringen (siehe Abbildung 4.16). Dieses vom Motor aufzubringende maximale Drehmoment liegt höher, als das zum Zeitpunkt der konstanten Beschleunigung bei einer Steigung von  $90^\circ$  benötigt wird. Aus dem Ergebnis dieser Berechnung kann geschlossen werden, dass der gewählte Schrittmotor für das Röntgensystem korrekt ausgelegt ist.

Als Stellgerät für den Schrittmotor dient die Schrittmotorsteuerung *SMCI47-S* (siehe Abbildung 4.22). Diese erzeugt die benötigten Stromimpulse zur Drehung des Schrittmotors.



**Abbildung 4.22: Schrittmotorsteuerung *SMCI47-S* [42]**

Über die seitlichen Anschlussklemmen der Steuerung werden die Wicklungen des Schrittmotors, die Sicherheitsbremse des Schrittmotors sowie ein induktiver Näherungssensor angeschlossen. Bei Spannungsverlust der Steuerung gehen die aktuellen Schritte des Schrittmotors verloren. Zur Referenzierung des Motors dient der induktive Näherungssensor, der seitlich an dem Führungswagen befestigt ist. Bei einer Referenzfahrt bewegt sich der Führungswagen entlang der Bogenführung bis der Referenzpunkt erreicht wird. Zur Erkennung des Referenzpunktes dient eine an einer Halterung befestigte Metallschraube, die in Abbildung 4.23 dargestellt wird. Bei Erkennung dieser Metallschraube durch den induktiven Näherungssensor stoppt der Führungswagen und die Schrittzahl des Motors wird zurückgesetzt.



**Abbildung 4.23: Metallschraube als Referenzposition**

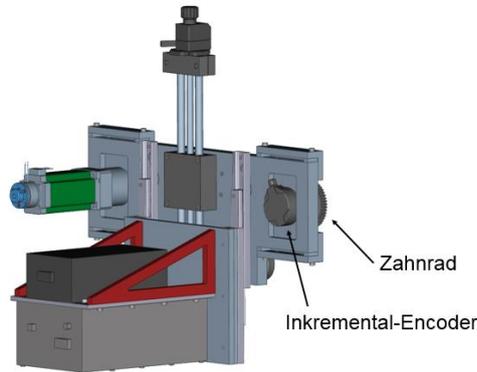
Zusätzlich sind in der Schrittmotorsteuerung die angelegten Fahrprofile im EEPROM gespeichert, auf die mittels Steuerbefehl zugegriffen wird. Zur Kommunikation zwischen dem Anwendercomputer und der Schrittmotorsteuerung dient eine RS485-Schnittstelle.

### **4.3.2 Synchronisierung der TDI-Kamera**

Bei der Aufnahme von Röntgenbildern mit Hilfe der TDI-Kamera muss die Aufnahmefrequenz der Zeilenbilder mit der Geschwindigkeit der TDI-Kamera exakt übereinstimmen, damit keine Verzerrungen der aufgenommenen Rundschweißnaht entstehen. In Kapitel 3.2.1 wurde dargestellt, dass die geometrische Vergrößerung  $V$  bei einer Röntgenaufnahme eine wesentliche Rolle für die Synchronisierung der Zeilenaufnahmen spielt. Zur Synchronisierung kann jedoch der einstellbare Kameraparameter *Position Encoder* nicht optimal genutzt werden. Der Grund hierfür sind die effektiven Auflösungen, die sich als Verhältnis der im Encoder eingestellten Auflösung zu dem Kameraparameter *Position Encoder* definieren (siehe Formel 3.3 aus Kapitel 3.1.4). Diese effektiven Auflösungen sind in Abhängigkeit der Vergrößerung nicht exakt einstellbar, sodass eine bessere Lösung zur Synchronisierung gefunden werden muss.

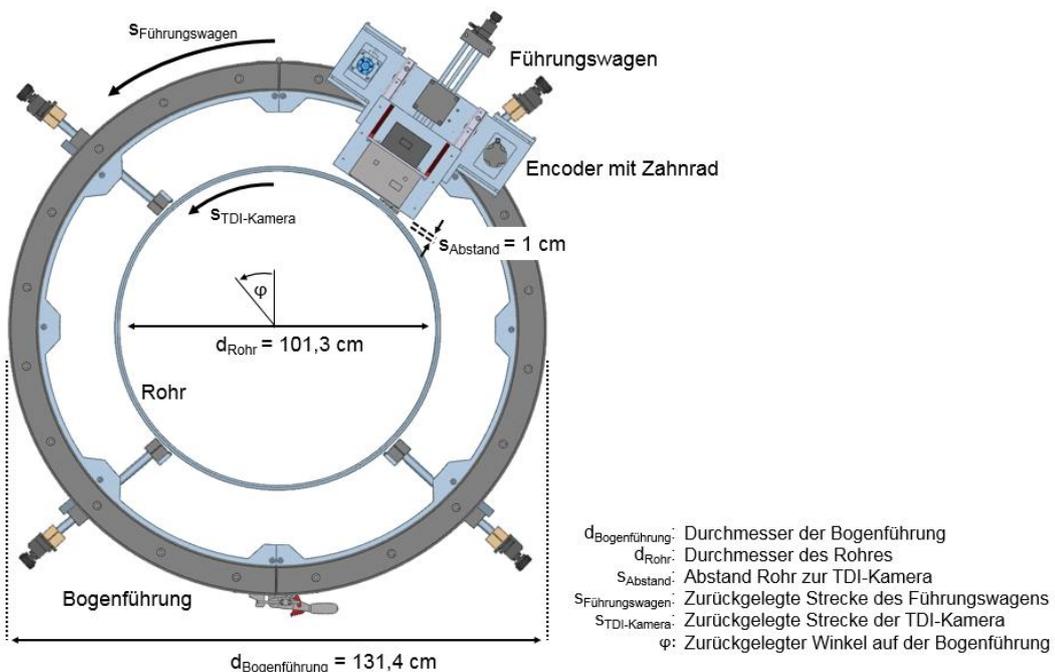
Anders als beim Teststand wird für die Umsetzung des Röntgensystems kein Messrad-Encoder als Taktgeber für die TDI-Kamera verwendet. Das daran befindliche Messrad würde einen Schlupf verursachen, sobald das Messrad den Kontakt zur Bogenführung verliert. Aus diesem Grund wird der Inkremental-Encoder *DFS60B-S4PC10000* verwendet, der mit einem Zahnrad verbunden und anschließend auf dem Zahnkranz der Bogenführung parallel mitgeführt wird. Dabei handelt es sich um einen programmierbaren Enco-

der mit einer Auflösung von 10.000 Impulse pro Umdrehung, der in Abbildung 4.24 dargestellt ist.



**Abbildung 4.24: Inkremental-Encoder am Führungswagen**

Während der Bewegung des Führungswagens dreht sich das Zahnrad des Encoders. Durch die Drehung wird ein Taktsignal, dessen Frequenz in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ist, an die TDI-Kamera ausgegeben. Dieses Taktsignal dient zur Ansteuerung der Zeilenaufnahmen. Wie in Abbildung 4.25 dargestellt wird, befindet sich der Encoder auf dem Führungswagen und umfährt das Rohr auf der Bogenführung. Je kleiner der Rohrdurchmesser ist, desto geringer ist die zurückgelegte Strecke der TDI-Kamera  $s_{\text{TDI-Kamera}}$  bei gleicher Wegstrecke des Führungswagens  $s_{\text{Führungswagen}}$ . Die TDI-Kamera wird mit Hilfe der Teleskopschienen möglichst nah an das Rohr positioniert, sodass sich zwischen dem Rohr und der TDI-Kamera ein Abstand von 1 cm einstellt. Dieser Abstand dient als Sicherheitsabstand für die TDI-Kamera.



**Abbildung 4.25: Wegstrecke der TDI-Kamera in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers**

Der auf der Bogenführung mitgeführte Encoder gibt in Abhängigkeit der eingestellten Auflösung das Taktsignal zur Ansteuerung der TDI-Kamera. Damit keine Verzerrungen in den Röntgenaufnahmen auftreten, muss die Auflösung des Encoders exakt auf die Position der TDI-Kamera eingestellt werden. Die Encoderauflösung bestimmt demnach die Aufnahme­frequenz der TDI-Kamera. Die verwendete TDI-Kamera besitzt eine Pixelbreite von 48 µm. Dementsprechend muss die Encoderauflösung so eingestellt werden, dass die Kamera während der Umfahrung des Rohres innerhalb einer Strecke von 48 µm ein Zeilenbild aufnehmen kann. Dies setzt voraus, dass der vom Inkremental-Encoder ausgehende Signaltakt auf die zurückgelegte Wegstrecke der TDI-Kamera über dem Rohr berechnet werden muss.

Auf Basis der in Abbildung 4.25 dargestellten Durchmesser  $d_{\text{Bogenführung}}$  und  $d_{\text{Rohr}}$  wird die benötigte Taktfrequenz zur Aufnahme der Röntgenbilder nachfolgend berechnet.

Die Wegstrecke, die der Führungswagen auf der Bogenführung während einer Umdrehung des Encoderzahn­rades zurücklegt, entspricht dem Umfang des Encoderzahn­rades  $U_{\text{Encoder}}$ . Der Durchmesser des Zahn­rads  $d_{\text{Encoder}}$  beträgt hierbei 7,35 cm.

$$U_{\text{Encoder}} = d_{\text{Encoder}} \cdot \pi = 7,35 \text{ cm} \cdot \pi = 23,0907 \text{ cm} \quad (4.22)$$

Anschließend wird die zurückgelegte Wegstrecke bei einer Umdrehung des Encoderzahn­rades als Kreisbogen  $\varphi_{\text{Encoder}}$  auf der Bogenführung berechnet.

$$\varphi_{\text{Encoder}} = \frac{U_{\text{Encoder}}}{d_{\text{Bogenführung}} \cdot \pi} \cdot 360^\circ = \frac{23,0907 \text{ cm}}{131,4 \text{ cm} \cdot \pi} \cdot 360^\circ = 20,137^\circ \quad (4.23)$$

Der Kreisbogen pro Umdrehung des Encoderszahn­rades beträgt  $20,137^\circ$ , der auch dem Kreisbogen der TDI-Kamera entspricht.

$$\varphi_{\text{Encoder}} = \varphi_{\text{TDI-Kamera}} = 20,137^\circ \quad (4.24)$$

Bei einer Umdrehung des Encoderzahn­rades ist die zurückgelegte Wegstrecke der TDI-Kamera  $s_{\text{TDI-Kamera}}$  bzw. einem Kreisbogen von  $20,137^\circ$  auf der Bogenführung durch den geringeren Abstand der TDI-Kamera zum Rohr kürzer als die zurückgelegte Wegstrecke des Führungswagens  $s_{\text{Führungswagen}}$ . Des Weiteren ist zu für die Berechnung der optimalen Encoderauflösungen der Abstand  $s_{\text{Abstand}}$  zwischen der TDI-Kamera und dem zu prüfenden Rohr zu berücksichtigen.

$$s_{\text{TDI-Kamera}} = [d_{\text{Rohr}} + (2 \cdot s_{\text{Abstand}}) \cdot \pi] \cdot \frac{\varphi_{\text{TDI-Kamera}}}{360^\circ} \quad (4.25)$$

$$s_{\text{TDI-Kamera}} = [101,3 \text{ cm} + (2 \cdot 1 \text{ cm}) \cdot \pi] \cdot \frac{20,137^\circ}{360^\circ} = 18,153 \text{ cm}$$

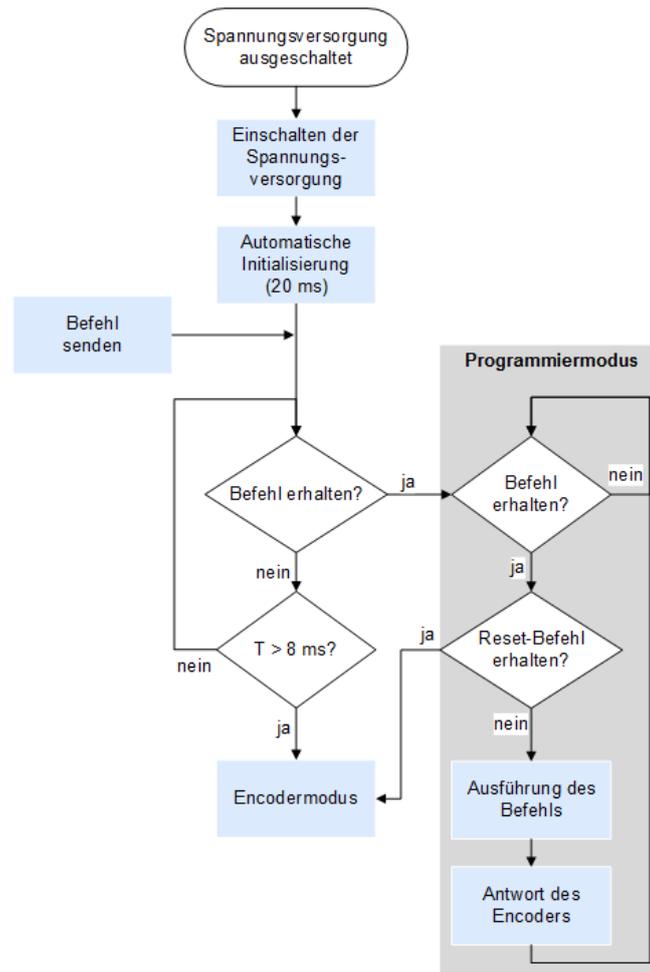
Pro Umdrehung des Encoderzahnrades hinterlegt die TDI-Kamera eine Wegstrecke von 18,153 cm. Bei einer Pixelbreite von 48  $\mu\text{m}$  und der zurückgelegten Wegstrecke muss die Auflösung des Encoders so eingestellt werden, dass die Zeilenaufnahmen im Abstand von 48  $\mu\text{m}$  durchgeführt werden. Diese optimale Auflösung  $R_{\text{optimal}}$  wird durch die Division der zurückgelegten Wegstrecke  $s_{\text{TDI-Kamera}}$  zu der Pixelbreite  $p_{\text{Breite}}$  berechnet.

$$R_{\text{optimal}} = \frac{s_{\text{TDI-Kamera}}}{p_{\text{Breite}}} = \frac{18,153 \text{ cm}}{48 \mu\text{m}} = 3.782 \quad (4.26)$$

Bei einer vollen Umdrehung des Encoderzahnrades werden 3.782 Impulse an die TDI-Kamera übergeben, die als externe Signaltakte dienen. Jeder Takt führt zu einer Zeilenaufnahme, bei der die Rundschweißnaht mit der richtigen Taktfrequenz aufgenommen wird. Bei Änderung des Rohrdurchmessers muss die vom Inkremental-Encoder ausgehende Signaltaktfrequenz für die TDI-Kamera angepasst werden.

Die Programmierung der Encoderauflösung kann über einen zwischengeschalteten Programmieradapter oder über ein Programmiergerät mit integriertem Display der Firma SICK durchgeführt werden [46, S. 7]. Diese Varianten setzen voraus, dass der Encoder bei Änderung der Auflösung aus dem Röntgensystem entnommen werden muss. Die Entnahme des Encoders aus dem Röntgensystem ist nicht praxistauglich und scheidet daher aus.

Damit der Encoder nicht aus dem System entnommen werden muss, werden Steuerbefehle an den Encoder gesendet, die dieser umsetzt und eine Rückantwort sendet. Der Datenaustausch zwischen dem Encoder und dem Computer erfolgt über eine RS485-Schnittstelle. Der Encoder muss zur Anpassung der Auflösung in den Programmiermodus gelangen. Der Eintritt in den Programmiermodus wird in Abbildung 4.26 beschrieben.

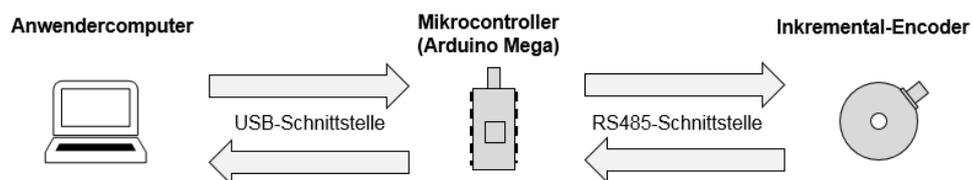


**Abbildung 4.26: Prozess zum Ein-/Austritt in/aus dem Programmiermodus**  
(Eigene Darstellung in Anlehnung an [19, S. 3])

An dem Encoder darf zunächst keine Spannungsversorgung anliegen. Um nun in den Programmiermodus zu gelangen, muss die Spannungsversorgung eingeschaltet werden. Nach dem Einschaltvorgang initialisiert sich der Encoder automatisch innerhalb einer Zeitspanne von 20 ms. Anschließend muss innerhalb von 8 ms ein vom Hersteller definierter Befehl in Hexadezimaldarstellung an den Encoder übertragen werden. Als Befehl wird der Befehl zum Auslesen der Encoderinformationen verwendet. Dieser Befehl besteht aus einer Adresse, einem Kommando und einer Checksumme. Wird die Zeitspanne von 8 ms überschritten, gelangt der Encoder in den normalen Betriebsmodus (Encodermodus). Wenn der Encoder den Befehl zum Auslesen der Encoderinformationen erhalten hat, gelangt der Encoder in den Programmiermodus. In diesem Modus werden die Befehle zum Auslesen der aktuell eingestellten Auflösung oder der Befehl zum Ändern der Auflösung gesendet. Sendet man einen Reset-Befehl an den Encoder, verlässt der Encoder den Programmiermodus und arbeitet im normalen Encodermodus.

Das Ein- und Ausschalten des Inkremental-Encoders wird mit Hilfe eines Mikrocontrollers durchgeführt, an dessen Ausgangspins eine Gleichspannung von 5 V anliegen. Der Encoder benötigt jedoch eine Versorgungsspannung von 12 V, sodass ein Optokoppler zwischengeschaltet werden muss. Dieser ermöglicht das Schalten von galvanisch getrennten Stromkreisen mit unterschiedlichen Spannungsniveaus.

Als Mikrocontroller dient der *Arduino Mega*, der über vier Universal Asynchronous Receiver Transmitter (kurz: UARTs) verfügt. Diese vier UARTs dienen als serielle Hardware Ports, über die der Arduino zeitgleich kommunizieren kann [31]. Ein UART wird zur Kommunikation über die USB-Schnittstelle zwischen dem Anwendercomputer und dem Arduino verwendet. Ein weiterer UART wird für ein RS485-Shield genutzt, welches auf dem *Arduino Mega* aufgesteckt wird. Dieses Shield ist ein Zusatzmodul, mit dem eine serielle Kommunikationsschnittstelle über RS485 aufgebaut wird. Der Encoder unterstützt ausschließlich diese Schnittstelle und muss daher zur Kommunikation zwischen dem Arduino und dem Encoder verwendet werden. Der Kommunikationsweg vom Anwendercomputer zum Inkremental-Encoder ist in folgender Abbildung 4.27 dargestellt.

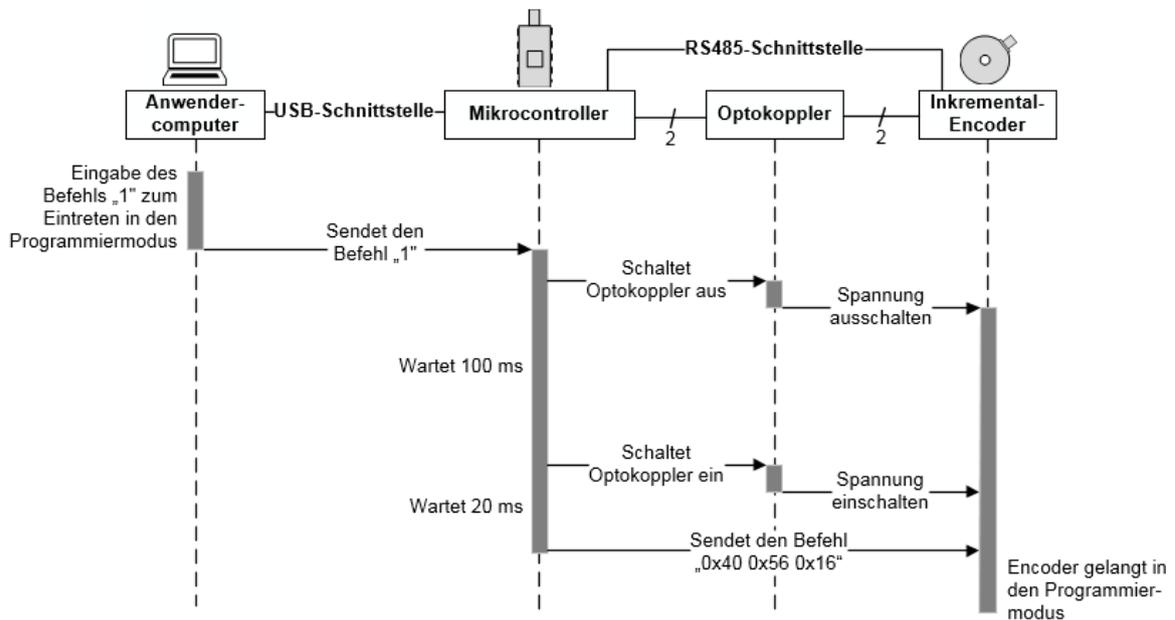


**Abbildung 4.27: Kommunikation zwischen Anwendercomputer und Encoder**

Vom Anwendercomputer werden Befehle über den Mikrocontroller an den Inkremental-Encoder gesendet. Dieser empfängt, führt den Befehl aus und sendet eine Rückantwort über den Mikrocontroller zurück an den Anwendercomputer. Die jeweiligen Befehle werden im Folgenden beschrieben.

▪ **Eintritt in den Programmiermodus**

In der folgenden Abbildung 4.28 wird der Ablauf zwischen dem Anwendercomputer und dem Encoder dargestellt, bei dem der Encoder in den Programmiermodus gelangt.

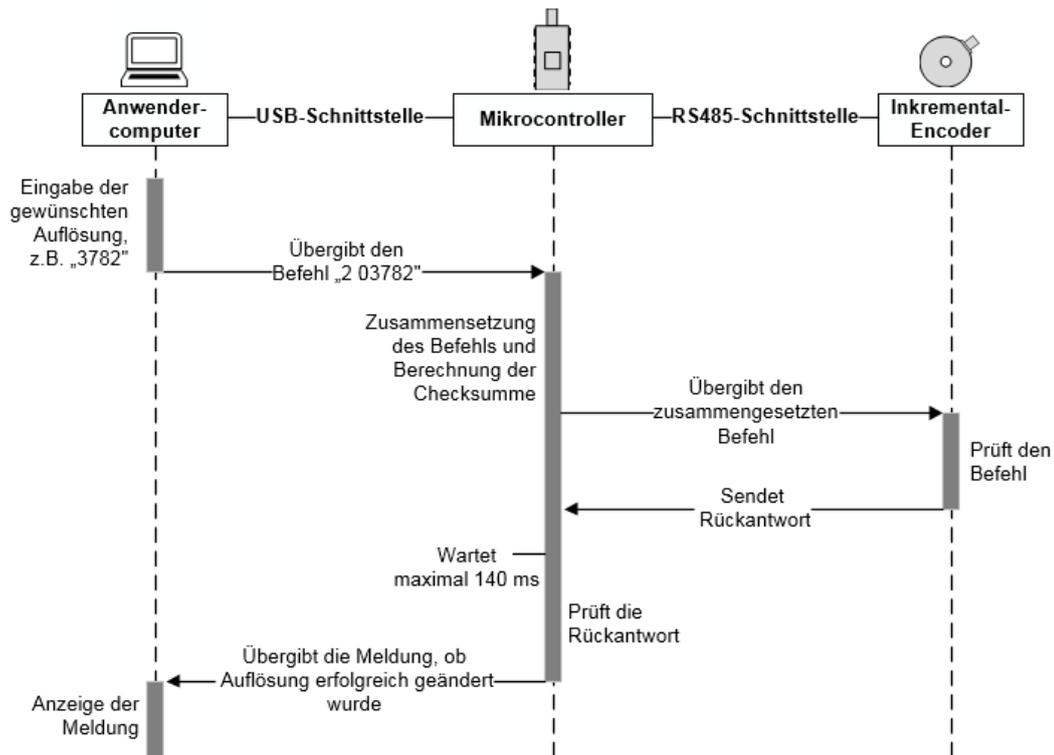


**Abbildung 4.28: Programmablauf zum Eintritt in den Programmiermodus**

Von dem Anwendercomputer wird der Befehl „1“ an den Mikrocontroller gesendet und dort eingelesen. Anhand des eingelesenen Befehls erkennt der Mikrocontroller, dass der Encoder in den Programmiermodus gelangen soll. Daraufhin trennt der Mikrocontroller die Spannungsversorgung am Optokoppler, der wiederum die Spannungsversorgung des Encoders ausschaltet. Nach einer Wartezeit von 100ms wird der Optokoppler wieder eingeschaltet. An dem Encoder liegt die Versorgungsspannung an, sodass nach einer Zeit von 20 ms die Initialisierung beendet wird. Nach der Initialisierung wird der Befehl zum Auslesen der Encoderinformationen gesendet, der sich aus drei Byte zusammensetzt. Daraufhin gelangt der Encoder in den Programmiermodus. In diesem Modus kann die Auflösung in dem Encoder ausgelesen oder verändert werden.

▪ **Setzen der Encoderauflösung**

Der Ablauf zum Setzen der Encoderauflösung ist in Abbildung 4.29 dargestellt.

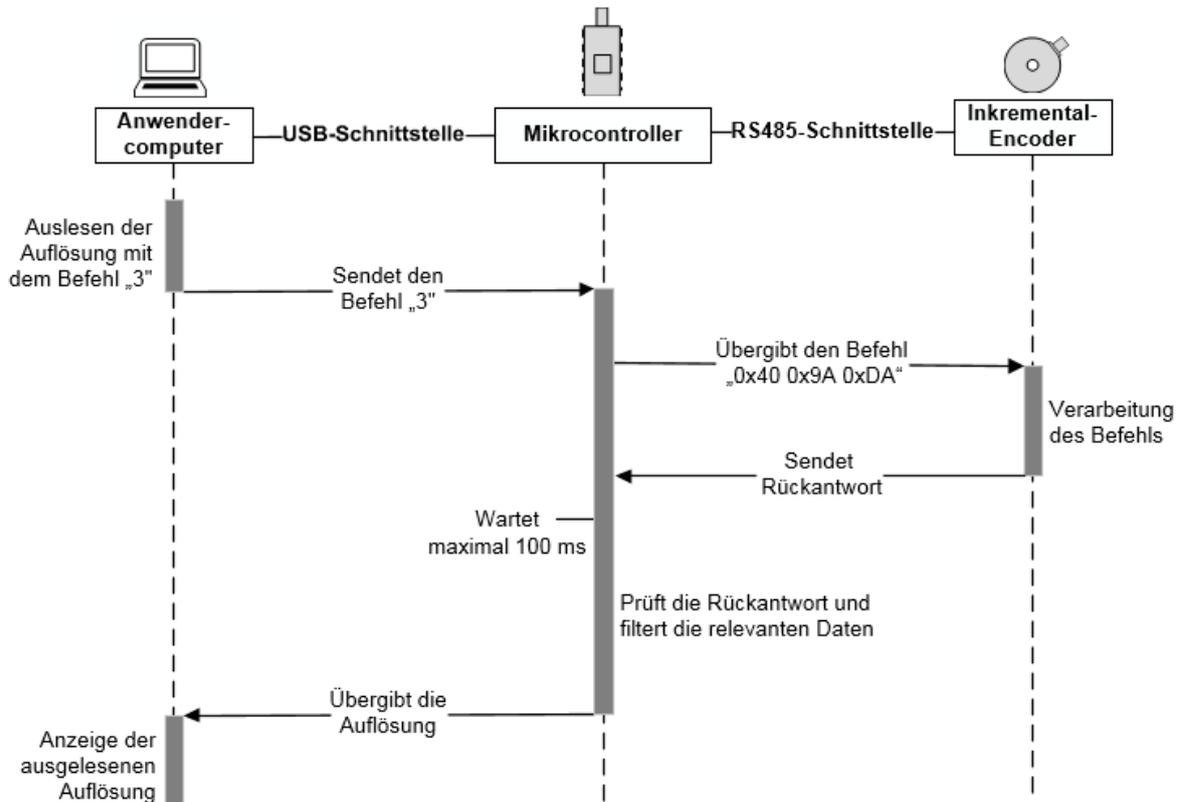


**Abbildung 4.29: Programmablauf zum Setzen der Auflösung**

Soll die Auflösung auf einen gewünschten Wert gesetzt werden, muss der Befehl „2 xxxxx“ an den Mikrocontroller gesendet werden, wobei der Platzhalter „xxxxx“ die gewünschte Auflösung darstellt. Für die Röntgenaufnahme des Rohres mit einem Durchmesser von 101,3 cm liegt die optimale Auflösung des Encoders bei 3.782. Der Befehl lautet demnach „2 03782“. Dieser Befehl wird vom Mikrocontroller weiterverarbeitet. Hier wird der Zahlenwert der gewünschten Auflösung auf drei Bytes aufteilt, die Checksumme berechnet und der gesamte Befehl zusammengesetzt. Anschließend sendet der Mikrocontroller den Befehl an den Encoder und wartet maximal 140 ms auf die Rückantwort. Laut Herstellerangaben wird nach einer Zeit von 129 ms eine Rückantwort vom Encoder an den Mikrocontroller gesendet [19, S. 9]. Die Rückantwort wird mit der zu erwartenden Antwort verglichen und gibt in Abhängigkeit der Datenkorrektheit eine Meldung an den Anwendercomputer. Bei korrekter Rückantwort wird die Statusmeldung „*Resolution set successfully!*“ auf dem Anwendercomputer angezeigt. Bei falscher Rückantwort oder Zeitüberschreitung wird hingegen die Meldung „*Resolution set unsuccessfully!*“ ausgegeben.

▪ **Auslesen der Encoderauflösung**

Das Auslesen der aktuell eingestellten Auflösung des Encoders ist in nachfolgender Abbildung 4.30 visualisiert.

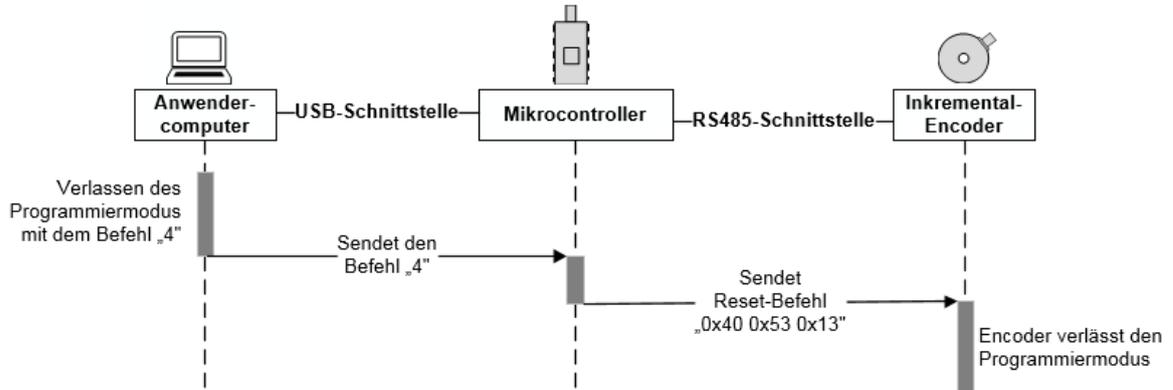


**Abbildung 4.30: Programmablauf zum Auslesen der Auflösung**

Um die Auflösung auszulesen, wird der Befehl „3“ an den Mikrocontroller gesendet und dort eingelesen. Der Mikrocontroller erhält diesen Befehl und sendet daraufhin den Befehl „0x40 0x9A 0xDA“ in Hexadezimaldarstellung. Der Encoder verarbeitet den Befehl und sendet nach einer Zeit von 7 ms die Rückantwort an den Mikrocontroller [19, S. 13]. Die Rückantwort besteht aus einer Länge von 37 Byte. Die darin enthaltene Auflösung wird von dem Mikrocontroller gefiltert und anschließend an den Anwendercomputer gesendet.

▪ **Austritt aus dem Programmiermodus**

Damit der Encoder zurück in den normalen Encodermodus gelangt, muss der Programmiermodus beendet werden (siehe Abbildung 4.31).



**Abbildung 4.31: Programmablauf zum Austritt aus dem Programmiermodus**

Dazu wird der Befehl „4“ von dem Anwendercomputer an den Mikrocontroller gesendet. Dieser setzt den Befehl um und sendet einen Reset-Befehl, der aus drei Byte besteht, an den Encoder. Nachdem der Encoder den Befehl eingelese hat, verlässt dieser den Programmiermodus.

**4.3.3 Schaltschrank**

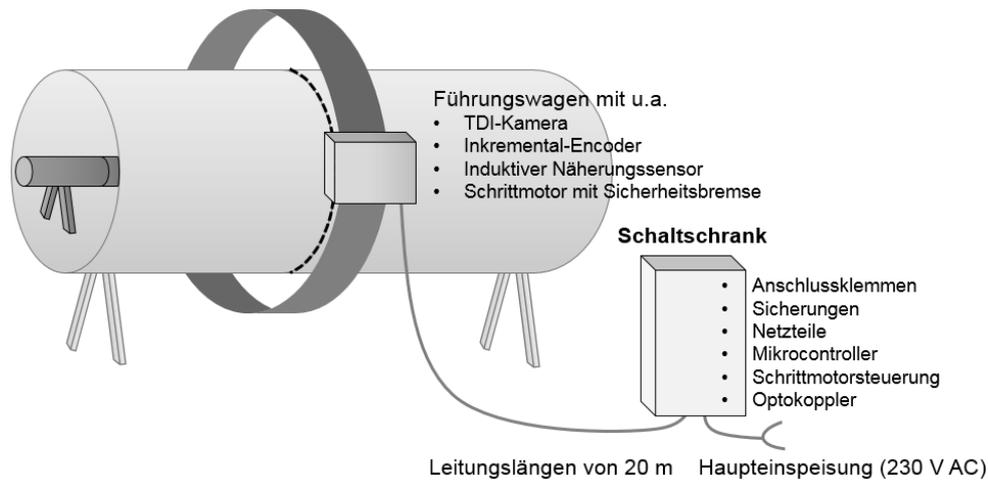
Die elektrischen Komponenten des Röntgensystems müssen mit Spannung versorgt werden. Die benötigten Spannungen sind je Komponente unterschiedlich, sodass die Eingangsspannung von 230 V Wechselfspannung (AC, engl. alternating current) auf eine niedrigere Gleichspannung (DC, engl. direct current) transformiert werden muss. Die Transformierung der Spannungsniveaus erfolgt durch Netzteile mit unterschiedlichen Ausgangsspannungen. Die wesentlichen elektrischen Komponenten des Röntgensystems mit ihrem jeweils benötigten Spannungsniveau sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

**Tabelle 4.4: Spannungsniveaus der elektrischen Komponenten des Röntgensystems**

Komponenten des Röntgensystems	Benötigte Spannung
TDI-Kamera	230 V AC
Schrittmotorsteuerung <i>SMCI47-S</i>	48 V DC
Inkremental-Encoder <i>DFS60B-S4PC10000</i>	12 V DC
Induktiver Näherungssensor	5 V DC
Mikrocontroller <i>Arduino Mega</i>	5 V DC
Optokoppler	5 V DC

Der Einbau der Netzteile sowie die elektrische Verdrahtung des gesamten Röntgensystems erfolgen im Schaltschrank.

Die wichtigsten Komponenten des Schaltschanks sind in Abbildung 4.32 dargestellt.



**Abbildung 4.32: Komponenten des Schaltschanks**

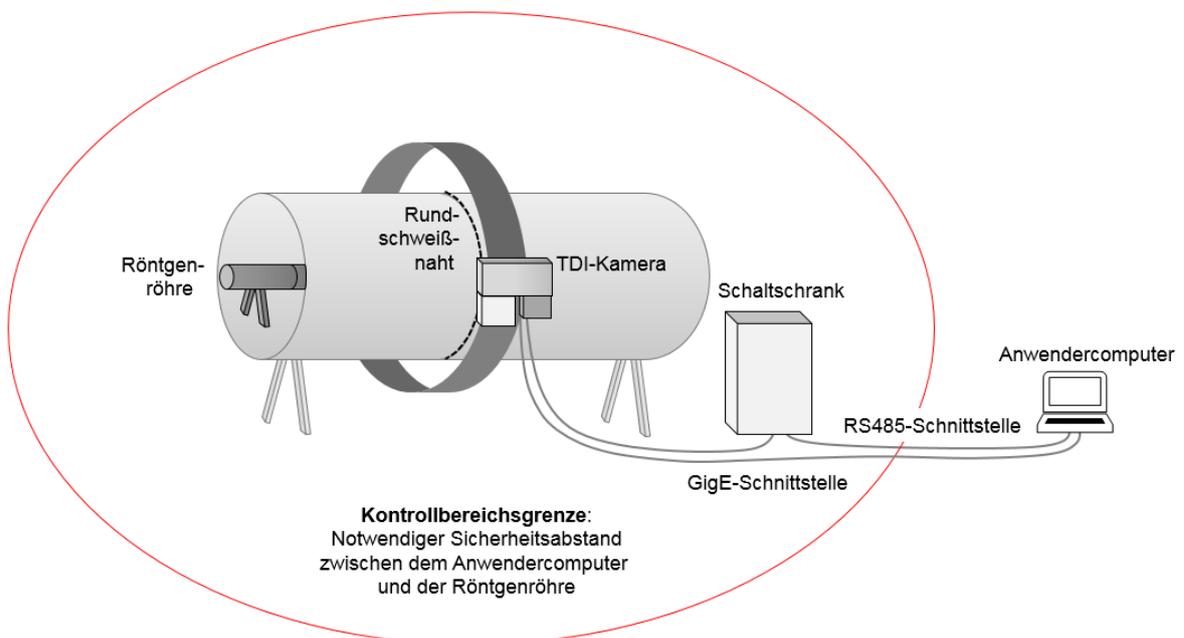
Die Haupteinspeisung des Schaltschanks erfolgt über eine Spannung von 230 V AC. Innerhalb dieses Schaltschanks befinden sich drei Netzteile, die jeweils über eine Sicherung abgesichert sind. Diese Sicherungen dienen zum Schutz vor Überlast und Kurzschluss. Schleppkettenfähige Leitungen sorgen zur Versorgung der in Tabelle 4.4 aufgelisteten Bauteile mit der jeweils benötigten Spannung. Der an dem Führungswagen montierte Schrittmotor, die Sicherheitsbremse sowie der induktive Näherungssensor werden über die schleppkettenfähigen Leitungen an der Schrittmotorsteuerung im Schaltschrank angeschlossen. Die Schrittmotorsteuerung befindet sich auf der im Schaltschrank befindlichen Hutschiene. Für die Anpassung der Auflösung im Inkremental-Encoder werden der benötigte Mikrocontroller sowie der Optokoppler ebenfalls im Schaltschrank eingebaut. Um lange Leitungslängen zu dem Röntgensystem zu vermeiden, steht der Schaltschrank in der Nähe des zu prüfenden Rohrs. Die Leitungslängen zwischen dem Schaltschrank und dem Röntgensystem sind für eine Reichweite von 20 m ausgelegt. Der umgesetzte Schaltschrank ist in Abbildung 4.33 dargestellt.



**Abbildung 4.33: Aufgebauter Schaltschrank**

#### 4.3.4 Schnittstellenauslegung

Bei dem zu entwickelten Röntgensystem handelt es sich um ein ortsveränderliches Röntgensystem, bei dem die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von Rundschweißnähten im Freien stattfinden soll. Aufgrund der gewünschten Nutzung im Freien kann für dieses Röntgensystem keine Strahlenschutzkabine zur Abschirmung der Röntgenstrahlung verwendet werden. Daher muss im Röntgenbetrieb ein Sicherheitsabstand zum Röntgensystem eingehalten werden. Der während einer Röntgenaufnahme notwendige Sicherheitsabstand, auch als Kontrollbereichsgrenze bezeichnet (siehe Abbildung 4.34), muss zwischen dem Anwendercomputer und dem Röntgensystem ermittelt werden.



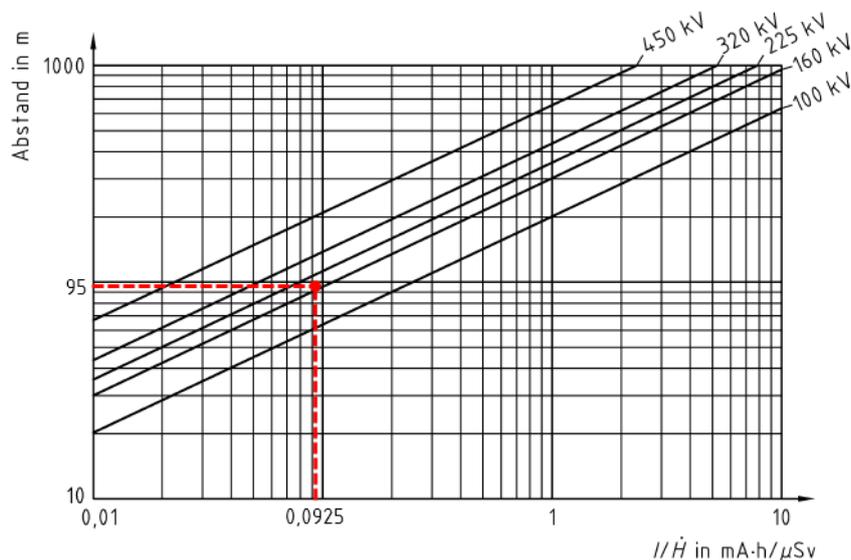
**Abbildung 4.34: Kontrollbereichsgrenze vom Anwendercomputer zum Röntgensystem**

Zur Einhaltung der DIN 54113-3 wird das umzusetzende Röntgensystem mit einer Rundstrahlröhre mit einer maximalen Röhrenspannung von 200 kV und einer maximalen Stromstärke von 3,7 mA betrieben [30, S. 29]. Diese Norm dient zur Strahlenschutzberechnung für Röntgeneinrichtungen mit bis zu einer Röhrenspannung von 1 MV.

Bei dem Betrieb von Röntgenröhren darf ein gewisser Kontrollbereichsgrenzwert nicht überschritten werden. In dem Bereich, in dem die Strahlenwerte unter diesem Wert liegen, dürfen sich die Personen aufhalten, die für die Röntgenprüfung tätig sind [20, S. 276]. Zur Ermittlung des Sicherheitsabstandes wird das Verhältnis aus der maximalen Stromstärke und dem Kontrollbereichsgrenzwert ermittelt. Bei einem ortveränderlichen Betrieb gilt ein Kontrollbereichsgrenzwert der Röntgenstrahlung von  $\dot{H} = 40 \mu\text{Sv/h}$  [13, S. 4].

$$\frac{I}{\dot{H}} = \frac{3,7 \text{ mA}}{40 \mu\text{Sv/h}} = 0,0925 \frac{\text{mA} \cdot \text{h}}{\mu\text{Sv}} \quad (4.27)$$

Auf Basis des errechneten Verhältnisses in Formel 4.27 mit Nutzung der maximalen Röhrenspannung von 200 kV wird der notwendige Sicherheitsabstand aus nachfolgender Abbildung 4.35 abgelesen. Bei einer Röhrenspannung von 200 kV liegt der Sicherheitsabstand bei 95 m.



**Abbildung 4.35: Ermittlung der Kontrollbereichsgrenze** [13, S. 3]

Eine Verringerung der Kontrollbereichsgrenze ist durch zusätzliche Abschirmungen wie Stellwände oder Bleitunnel möglich [12, S. 6].

Nach Berechnung des Sicherheitsabstandes werden die Schnittstellen zwischen dem Anwendercomputer und dem Röntgensystem definiert. Wie in Kapitel 3.1.6 beschrieben wurde, wird für den Datenaustausch zwischen der TDI-Kamera und dem Anwendercomputer das Protokoll GigE-Vision verwendet, welches Reichweiten von bis zu 100 m ermöglicht [36].

Damit ein Sicherheitsabstand von 95 m eingehalten werden kann, kommunizieren der Mikrocontroller sowie die Schrittmotorsteuerung im Schaltschrank über zwei RS485-Schnittstellen, die jeweils über einen zwischen geschalteten Schnittstellenumsetzer (RS485 auf USB) an den Anwendercomputer angeschlossen werden. Durch diese Umwandlung auf RS485 können Daten über eine Reichweite von mehreren Kilometern übertragen werden, sodass ein Kontrollbereich von 95 m problemlos eingehalten wird [4, S. 645].

## 4.4 Programmtechnische Konzeptionierung und Umsetzung

Im nachfolgendem Kapitel wird die programmtechnische Umsetzung des Röntgensystems beschrieben. Diese umfasst das entwickelte Steuerungsprogramm mit *LabVIEW* mit der Einbindung einer eigens entwickelten sowie der mitgelieferten DLL des TDI-Kameraherstellers *X-Scan*. Zusätzlich wird auf Basis des entwickelten Steuerungsprogramms die Bedienoberfläche für den Anwender beschrieben.

### 4.4.1 Bedienoberfläche

Das mit *LabVIEW* erstellte Anwendungsprogramm zur Steuerung des Röntgensystems befindet sich auf dem Anwendercomputer und wird von dort aus bedient. Wird das Anwendungsprogramm gestartet, wird dem Anwender eine Oberfläche mit unterschiedlichen Bedien- und Anzeigeelementen dargestellt (siehe Abbildung 4.36).

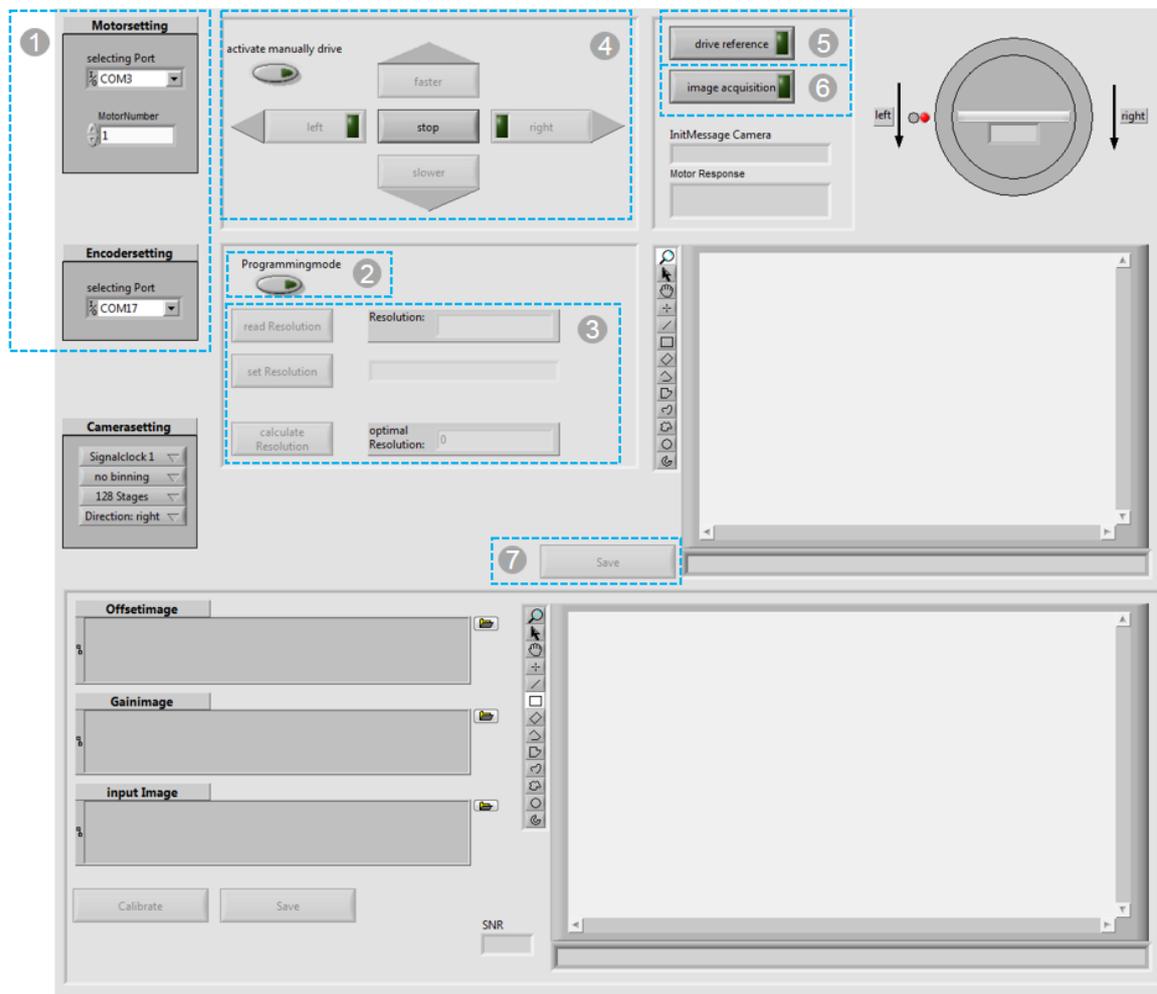


Abbildung 4.36: Bedienoberfläche zur Steuerung des Röntgensystems

Bevor die einzelnen Elemente der Bedienoberfläche erläutert werden, wird dem Leser anhand der Abbildung 4.37 der schematische Ablauf zur Bedienung des Röntgensystems visualisiert.

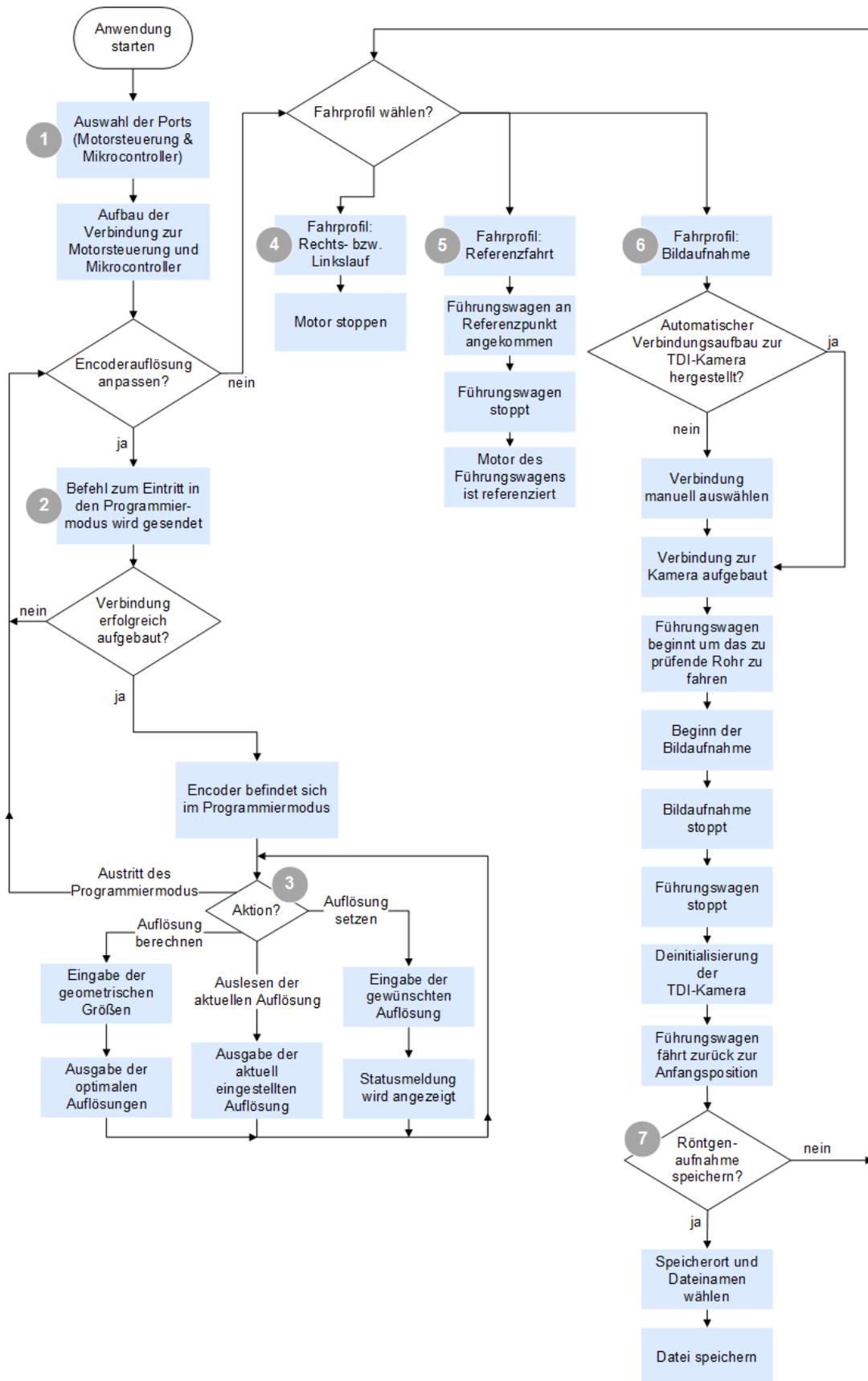
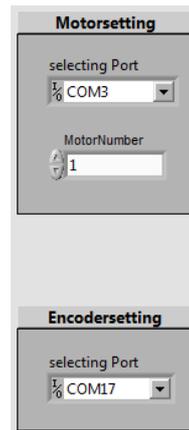


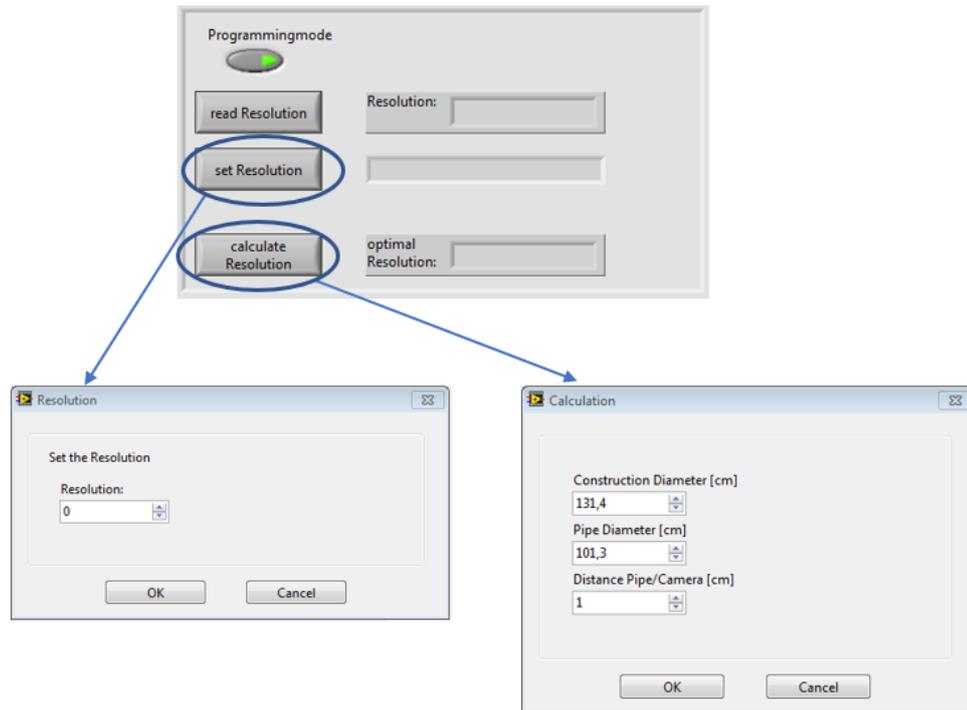
Abbildung 4.37: Programmablauf zur Bedienung des Röntgensystems

Die Kommunikation zwischen dem Anwendercomputer und der Schrittmotorsteuerung sowie auch die Kommunikation über einen Mikrocontroller zu dem Encoder setzen die korrekte Wahl des COM-Ports voraus. Die Auswahl des COM-Ports für die seriellen Schnittstellen RS-485 wird über die Auswahlmenüs auf der linken Seite der Bedienoberfläche ermöglicht ①. Zusätzlich zum COM-Port wird die Motornummer zur Ansteuerung des Schrittmotors eingetragen. Ein Auszug zur Einstellung dieser seriellen Schnittstellen zeigt Abbildung 4.38.



**Abbildung 4.38: Bedienoberfläche zur Auswahl der Ports für die seriellen Schnittstellen**

Nach dem Verbindungsaufbau muss zur Synchronisierung des Röntgensystems die Encoderauflösung angepasst werden. Um die Encoderauflösung einstellen zu können oder die aktuell eingestellte Auflösung auslesen zu können, muss der Encoder in den Programmiermodus gebracht werden. Dies geschieht über die Betätigung des Schalters *Programmingmode* ②, bei dem der in Kapitel 4.3.2 dargestellte Programmablauf zum Eintritt in den Programmiermodus durchgeführt wird. Eine zusätzliche Leuchtdiode (LED, engl. light-emitting diode) an dem Schalter stellt den Eintritt in den Modus dar (siehe Abbildung 4.39). Zusätzlich werden die Taster *read Resolution*, *set Resolution* und *calculate Resolution* angezeigt, die unterschiedliche Aktionen ausführen ③.



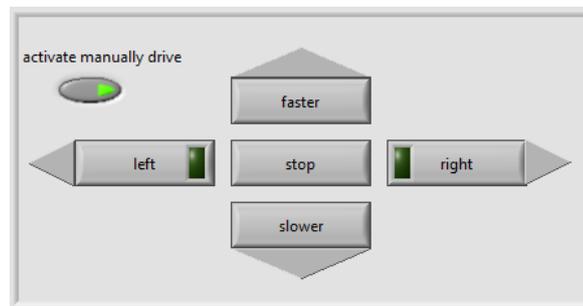
**Abbildung 4.39: Bedienoberfläche zur Anpassung der Auflösung im Encoder**

Über den Taster *read Resolution* wird der in Kapitel 4.3.2 dargestellte Programmablauf zum Auslesen der Auflösung aus dem Inkremental-Encoder ausgeführt. Der Encoder sendet die aktuell eingestellte Auflösung als Rückantwort an den Anwendercomputer, die auf der Bedienoberfläche in dem Textfeld *Resolution* angezeigt wird.

Die Berechnung der optimalen Auflösung erfolgt über den Taster *calculate Resolution*. Betätigt der Anwender diesen Taster, öffnet sich ein weiteres Fenster und der Anwender muss den Durchmesser der Bogenführung, den Rohrdurchmesser sowie den Abstand zwischen dem Rohr und der TDI-Kamera eintragen. Auf Basis der eingetragenen Werte erfolgt die Berechnung der optimalen Auflösung und die Anzeige dieser in dem Textfeld *optimal Resolution*. Über den Taster *set Resolution* wird die Auflösung in dem Encoder geändert. Dazu öffnet sich ein neues Fenster, in dessen Feld „Resolution“ die gewünschte Auflösung eingetragen wird. Die Auflösung wird nun an den Mikrocontroller gesendet, der diese umsetzt und den in Kapitel 4.3.2 dargestellten Befehl zum Setzen der Auflösung an den Inkremental-Encoder sendet. Anschließend erhält der Mikrocontroller eine Rückantwort vom Encoder und wertet diese aus. In Abhängigkeit dieser Rückantwort wird dem Anwender eine Statusmeldung zur Änderung der Auflösung angezeigt.

Nach korrekt eingestellter Auflösung kann der Encoder den Programmiermodus verlassen und im Encodermodus betrieben werden. Dazu muss der Schalter *Programmingmode* erneut betätigt werden, sodass daraufhin der in Kapitel 4.3.2 dargestellte Programmablauf zum Verlassen des Programmiermodis ausgeführt wird.

Um den Führungswagen mit der darauf befindlichen TDI-Kamera entlang der Bogenführung bewegen zu können, muss der Schalter *activate manually drive* betätigt werden (siehe Abbildung 4.40). Dabei aktivieren sich die vier Taster *left*, *right*, *slower*, *faster*, mit denen der Führungswagen zur Rechts- und Linksdrehung sowie zur schnelleren und langsameren Umrundung des zu prüfenden Rohres angesteuert wird ④.



**Abbildung 4.40: Bedienoberfläche zur manuellen Steuerung des Führungswagens**

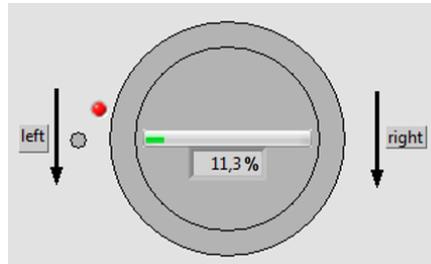
Bei Betätigung des Tasters *stop* wird der Führungswagen mit der TDI-Kamera gestoppt. Durch eine erneute Betätigung des Schalters *activate manually drive* wird der Modus zur manuellen Fahrt der TDI-Kamera verlassen und die oben genannten vier Taster werden deaktiviert.

Bei einem Spannungsverlust der Motorsteuerung werden die gefahrenen Schritte des Schrittmotors nicht gespeichert. Beim Anlegen einer Spannung muss die Schrittzahl auf eine bekannte Position referenziert werden. Bei Betätigung des Tasters *drive reference* fährt der Führungswagen um die Bogenführung herum bis der induktive Näherungssensor auslöst ⑤. Durch die Auslösung des Sensors stoppt der Führungswagen automatisch und setzt die Schrittzahl des Schrittmotors zurück. Damit kann die Position der TDI-Kamera berechnet und dem Anwender korrekt dargestellt werden.

Nach Einstellung der Encoderauflösung sowie der Referenzierung des Schrittmotors kann über den Taster *image acquisition* eine Röntgenaufnahme der Rundschweißnaht durchgeführt werden ⑥. Dies setzt eine Kommunikationsverbindung zur TDI-Kamera voraus. Der Verbindungsaufbau basiert auf dem im Testprogramm (siehe Kapitel 3.1.6) geschriebenen Quellcode und wird in Kapitel 4.4.2 näher beschrieben. Der grundsätzliche Ablauf einer Röntgenaufnahme sowie die Bedienung der Anwenderoberfläche stehen in diesem Kapitel im Vordergrund.

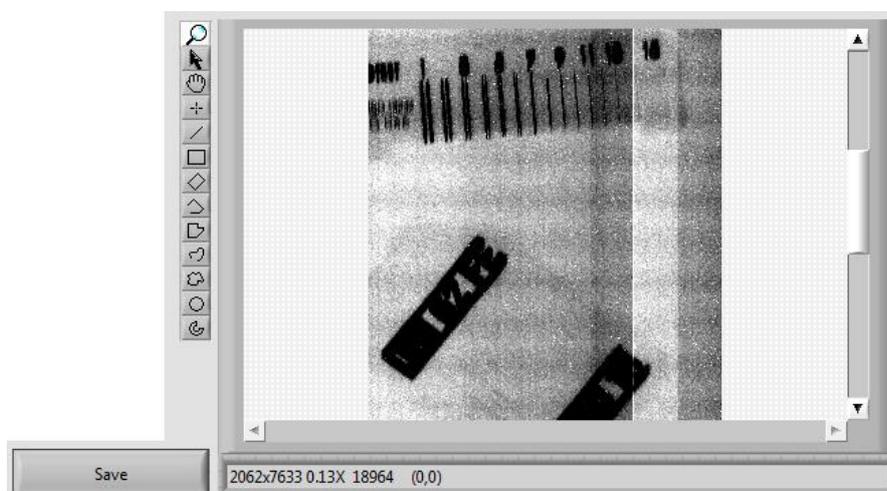
Nach Aufbau der Verbindung beginnt die Fahrt des Führungswagens entlang der Bogenführung um das zu prüfende Rohr. Nach dem Anfahrvorgang beginnt die Aufnahme eines Röntgenbildes durch die TDI-Kamera. Ein Anzeigebalken sowie eine Prozentanzeige stellen den Fortschritt der Röntgenaufnahme dar, wie es in Abbildung 4.41 dargestellt ist.

Während der Fahrt wird die aktuelle Position der TDI-Kamera auf der Bogenführung berechnet und dem Anwender auf der Bedienoberfläche als roter Punkt seitlich der Bogenführung dargestellt.



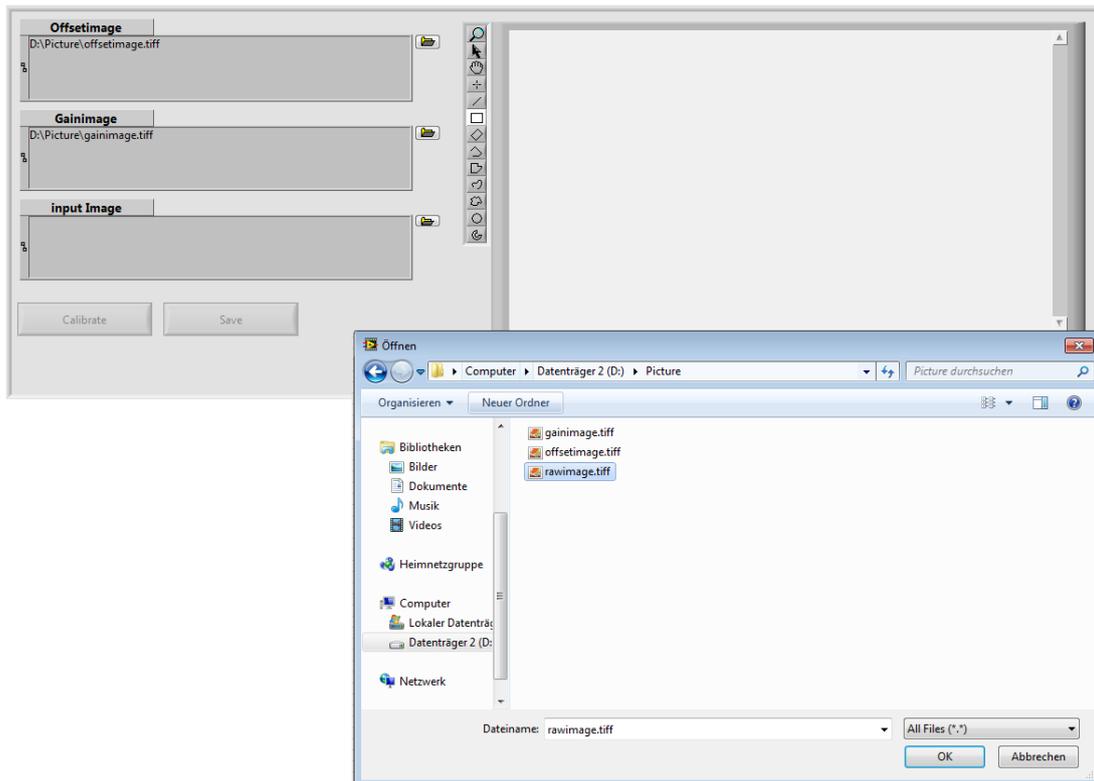
**Abbildung 4.41: Fortschrittsanzeige der Röntgenaufnahme**

Die Bildaufnahme wird nach einer Umrundung des Rohres beendet und der Führungswagen mit der TDI-Kamera gestoppt. Anschließend wird die TDI-Kamera in die entgegengesetzte Richtung angetrieben, bis die Anfangsposition erreicht wird. Das entstandene unkalibrierte Röntgenbild wird dem Anwender auf der Oberfläche dargestellt (siehe Abbildung 4.42) und mit dem Taster *Save* auf der Festplatte des Anwendercomputers gespeichert <sup>7</sup>.



**Abbildung 4.42: Bedienoberfläche zur Darstellung des unkalibrierten Röntgenbildes**

Das gespeicherte unkalibrierte Röntgenbild muss anschließend mit den entsprechenden Kalibrierbildern – Offset- und Gainbild – kalibriert werden. Die Dateipfade der Kalibrierbilder werden über die Eingabefelder gewählt, die in Abbildung 4.43 dargestellt sind. Sobald alle Dateipfade eingetragen sind, aktiviert sich der Taster *Calibrate*. Bei Betätigung dieses Tasters wird eine Kalibrierung nach dem Verfahren aus Kapitel 3.1.5 durchgeführt. Im Anschluss daran wird das kalibrierte Röntgenbild dargestellt und über den Taster *Save* gespeichert.



**Abbildung 4.43: Bedienoberfläche zur Kalibrierung des Röntgenbildes**

Nachdem die Bedienoberfläche mit deren Funktionalitäten beschrieben wurde, wird im Kapitel 4.4.2 die Umsetzung des Steuerungsprogramms beschrieben.

## 4.4.2 Steuerungsprogramm

Das Steuerungsprogramm wird mit einer grafischen Programmiersyntax in der Software *LabVIEW* erstellt. Die Programmierung des grafischen Quellcodes erfolgt auf dem Blockdiagramm, auf dem sogenannte Funktionsblöcke per Drag & Drop erstellt werden. Diese Funktionsblöcke werden mit Verbindungslinien miteinander verknüpft und stellen eine datenflussorientierte Abarbeitung des Programmes dar [3, S. 187]. Die in *LabVIEW* erstellten Programme werden als virtuelle Instrumente (kurz: VIs) bezeichnet, die wiederum Unterprogramme (SubVIs) enthalten können [44, S. 1] [3, S. 95]. Diese SubVIs dienen zur Wiederverwendung eines bereits programmierten Codes sowie zur Verbesserung der Übersichtlichkeit von großen Programmen.

Zur Steuerung des Röntgensystems wird das Programm *Pipeinspection.vi* erstellt. Um den Schrittmotor, den Encoder sowie die TDI-Kamera in ein Gesamtsystem zu integrieren, müssen die benötigten Hardwarebauteile unterschiedlicher Hersteller von dem Steuerungsprogramm aus angesteuert werden. Die Abbildung 4.44 stellt die Komponenten des Steuerungsprogramms dar, die im Nachfolgenden detaillierter beschrieben werden.

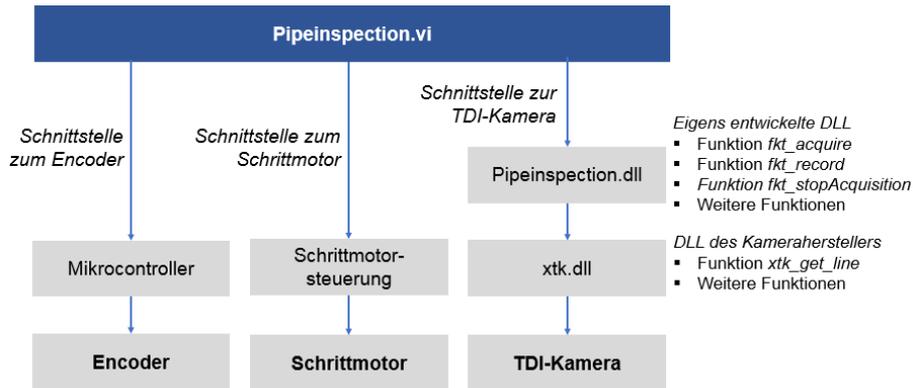


Abbildung 4.44: Integrierte Komponenten des Steuerungsprogramms *Pipeinspection.vi*

▪ **Aufbau der Schnittstellen zum Encoder sowie zum Schrittmotor**

Die Kommunikation zwischen dem Steuerungsprogramm und dem Encoder sowie dem Schrittmotor erfolgt über die Ports der seriellen USB-Anschlüsse des Anwendercomputers. Der Aufbau einer solchen Kommunikation erfolgt in *LabVIEW* über vorgefertigte Kommunikationsbausteine, die in Abbildung 4.45 gezeigt werden.

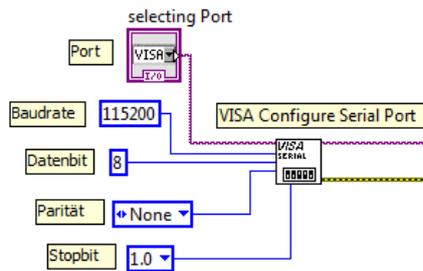
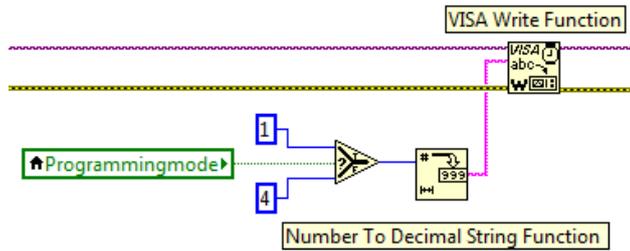


Abbildung 4.45: Verbindungsaufbau der seriellen Schnittstellen

▪ **Berechnung und Anpassung der Encoderauflösung**

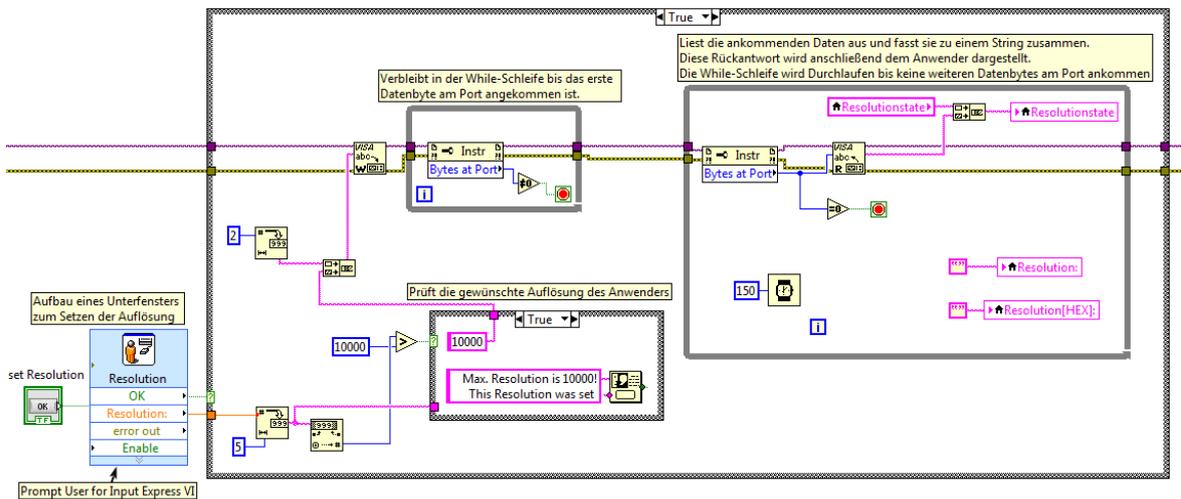
Für die Berechnung und Anpassung der Encoderauflösung dienen die drei Taster *read*, *set* und *calculate Resolution*, dessen Funktionen in Kapitel 4.4.1 beschrieben sind. Bei Betätigung eines dieser Taster muss auf den Änderungszustand reagiert werden. In *LabVIEW* wird ein solches Verhalten mittels einer Case-Struktur umgesetzt [3, S. 280f.]. Eine Case-Struktur enthält ein oder mehrere Cases, die in Abhängigkeit eines Eingangsereignisses durchgeführt werden. In diesem Fall ist das Eingangsereignis die Betätigung des Tasters.

Um in den Programmiermodus des Encoders zu gelangen, muss der Schalter *Programmingmode* betätigt werden. Der Änderungszustand des Schalters wechselt von false auf true und reagiert mit dem Eintritt in den entsprechenden Case. Nun wird der Case ausgeführt und sendet eine „1“ über die serielle Schnittstelle an den Mikrocontroller (siehe Abbildung 4.46). Bei erneuter Betätigung des Schalters *Programmingmode* wird eine „4“ an den Mikrocontroller gesendet, das zum Austritt aus dem Programmiermodus führt.



**Abbildung 4.46: Auszug des Steuerungsprogramms zum Ein-/Austritt in/aus dem Programmiermodus**

Um die Auflösung des Encoders auf einen gewünschten Wert zu ändern, muss der Befehl „2“ sowie die gewünschte Auflösung an den Mikrocontroller gesendet werden. Der Mikrocontroller setzt den ankommenden Befehl so um, dass der Encoder die gewünschte Auflösung über die serielle Schnittstelle einlesen kann. Sobald eine Rückantwort von dem Encoder kommt, wird diese Antwort von dem Steuerungsprogramm eingelesen und dem Anwender als Meldung angezeigt. Die maximal zu setzende Auflösung beträgt 10.000. Bei Eingabe von Auflösungen über 10.000 wird eine Rückmeldung an den Anwender ausgegeben und der Maximalwert von 10.000 automatisch gesetzt. Der Programmteil zum Setzen der Auflösung ist in folgender Abbildung 4.47 dargestellt.



**Abbildung 4.47: Auszug des Steuerungsprogramms zum Setzen der Auflösung**

Zum Auslesen der Auflösung wird der Befehl „3“ über die serielle Schnittstelle gesendet. Dieser Befehl wird von dem Mikrocontroller eingelesen, verarbeitet und an den Encoder gesendet. Der Encoder sendet den in Kapitel 4.3.2 dargestellten Befehl an den Mikrocontroller zurück, der die Auflösung an den Anwendercomputer sendet. Sobald die Daten ankommen, werden diese eingelesen und zu einem String zusammengesetzt. Die aktuell im Encoder eingestellte Auflösung wird als zusammengesetzter String dem Anwender

dargestellt. Ein Auszug aus dem Steuerungsprogramm zum Auslesen der Auflösung ist in Abbildung 4.48 dargestellt.

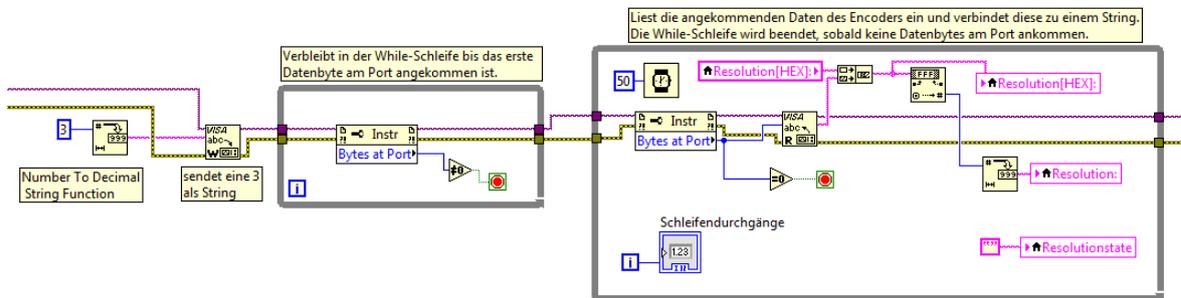


Abbildung 4.48: Auszug des Steuerungsprogramms zum Auslesen der Auflösung

▪ **Steuerung des Schrittmotors über die Schrittmotorsteuerung**

Die Ansteuerung des Schrittmotors erfolgt über die Motorsteuerung, die sich innerhalb des Schaltschranks befindet. Auf dem EEPROM der Steuerung sind unterschiedliche Fahrprofile hinterlegt, auf die von *LabVIEW* zugegriffen wird. Möchte der Anwender den Schrittmotor und somit den Führungswagen bewegen, muss der Anwender über die Bedienoberfläche einen Taster zur Steuerung des Führungswagens betätigen. Die Betätigung führt zum Aufruf eines Cases innerhalb der Case-Struktur. Hier wird ein vom Motorhersteller *Nanotec* definierter Befehl zur Ansteuerung des Motors generiert, der anschließend über die RS485-Schnittstelle an die Motorschrittsteuerung gesendet wird. Der Befehl beginnt mit dem Zeichen „#“ und endet mit einem Carriage-Return „\r“ [43, S. 10]. Zwischen den Zeichen befindet sich der eigentliche Befehl für die Schrittmotorsteuerung. Dazu werden die Motornummer, die Nummer des hinterlegten Fahrprofils sowie die Aktion des Befehls an die Schrittmotorsteuerung übergeben. Anhand der manuellen Linksdrehung des Schrittmotors wird die Ansteuerung im Nachfolgendem erläutert. Das Fahrprofil zur Linksdrehung befindet sich auf dem EEPROM an erster Stelle. Um das erste Fahrprofil laden zu können, wird der Befehl mit Hilfe der SubVI *ExecCmd.vi* zu dem String #1y1A\r zusammengesetzt und an die Motorsteuerung gesendet. Innerhalb dieser SubVI wird eine weitere SubVI *ReadoutAnswer.vi* zum Auslesen der Rückantwort aufgerufen. Die Rückantwort der Motorsteuerung wird ausgelesen und mit der zur erwartenden Rückantwort verglichen. Wenn diese gleich sind, wird die Rückmeldung der Motorsteuerung in eine für den Anwender lesbare Meldung ersetzt und auf der Bedienoberfläche angezeigt. Der Programmteil zur Ansteuerung des Schrittmotors über die SubVI *ExecCmd.vi* sowie das Einlesen der Rückantwort über die SubVI *ReadoutAnswer.vi* ist in folgender Abbildung 4.49 dargestellt.

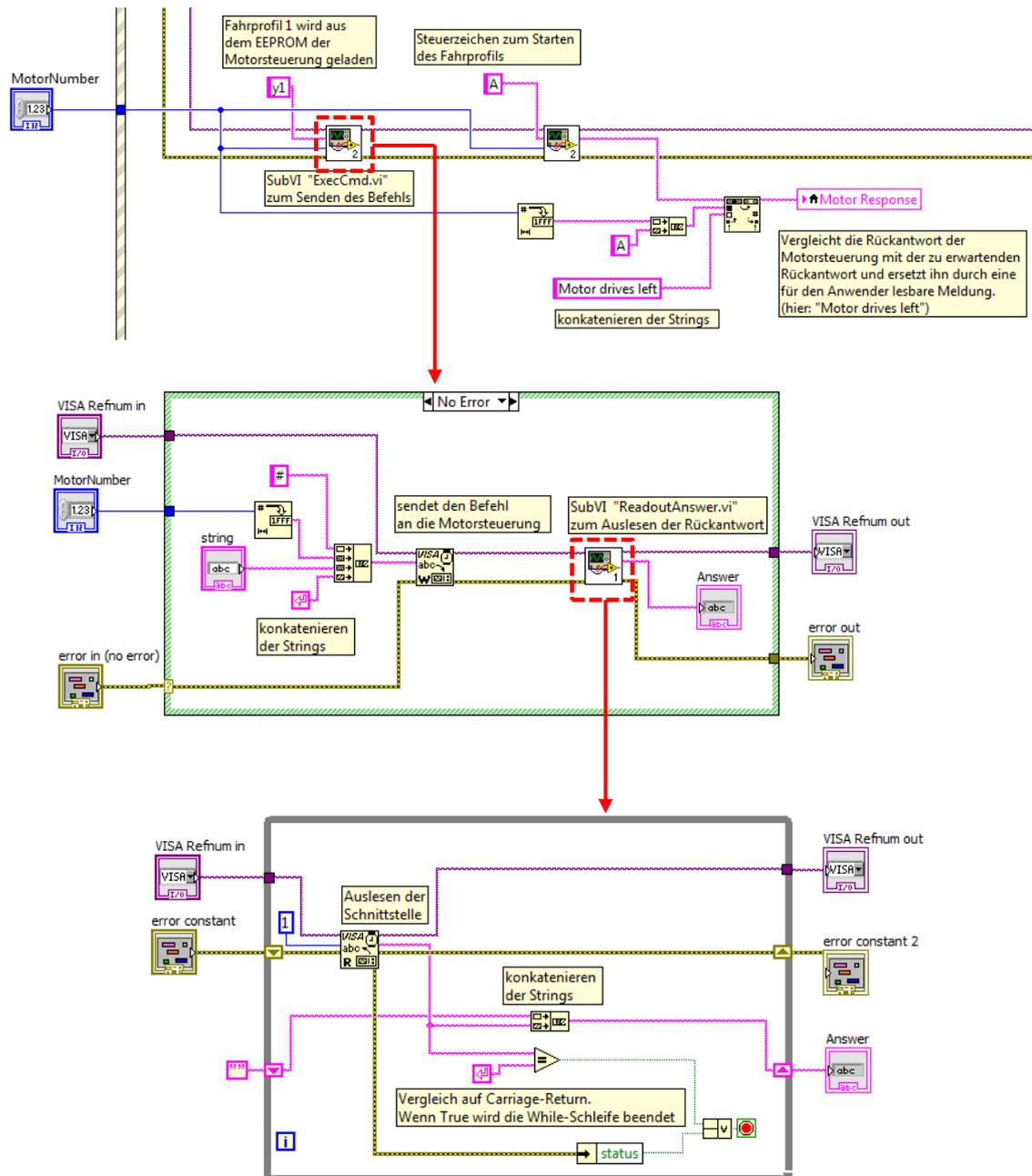


Abbildung 4.49: Auszug des Steuerungsprogramms zur Ansteuerung des Schrittmotors

- **Ansteuerung der TDI-Kamera**

Um eine Ansteuerung der TDI-Kamera aus *LabVIEW* zu ermöglichen, wird eine selbstentwickelte DLL in *LabVIEW* eingebunden. Durch diese DLL werden Funktionen aufgerufen, die zur Initialisierung, zur Ansteuerung von Bildaufnahmen sowie zur Parametrierung der TDI-Kamera dienen. Das geschriebene Testprogramm aus dem Teststand (siehe Kapitel 3.1.6) hat bereits gezeigt, dass die entwickelten Funktionen sowie der Ablauf des Testprogramms fehlerfrei funktionieren. Auf Basis des im Testprogramm erstellten Quellcodes wird nun die DLL *Pipeinspection.dll* erstellt, bei der einige Funktionen aus dem Testprogramm in angepasster Form verwendet werden. Für das Testprogramm aus dem Test-

stand werden Vektoren für die Übergabe von Funktionswerten genutzt. Vektoren sind vergleichbar mit Arrays, wobei die Anzahl der Elemente dynamisch wachsen kann [1, S. 328]. Die Klasse der Vektoren gehört zu den Aufrufkonventionen von C++. Um eine DLL für das Röntgensystem erzeugen zu können, dürfen nur C-Aufrufkonventionen verwendet werden, sodass für die Übergabe von Funktionswerten die Klasse der Vektoren durch Pointer ersetzt werden [45].

Damit das entwickelte Steuerungsprogramm *Pipeinspection.vi* auf die geschriebenen Funktionen der DLL zugreifen kann, müssen die in der DLL enthaltenen Funktionen mit dem Schlüsselwort *extern "C" \_declspec(dllexport)* deklariert werden. Die Deklaration führt zum Export der Funktionen, wodurch sie außerhalb der dynamischen Bibliothek sichtbar werden.

Die DLL *Pipeinspection.dll* enthält unter anderem die Funktionen *fkt\_acquire* und *fkt\_record*. Mit der Funktion *fkt\_acquire* wird die Anzahl der aufzunehmenden Zeilenbilder mittels des Parameters *nFrames* als Funktionsparameter vorgegeben. Wenn der Funktionsparameter „0“ übergeben wird, wird die Funktion *fkt\_record* aufgerufen, die zur Aufnahme von Zeilenbildern dient, bis der Anwender die Bildaufnahme manuell stoppt. Beim Stopp wird die boolsche Variable *doAcquisition* auf *false* gesetzt, sodass die While-Schleife nicht mehr durchlaufen wird. Der Quellcode der Funktion *fkt\_acquire* ist in Abbildung 4.50 dargestellt.

```
extern "C" _declspec(dllexport) void fkt_acquire(int nFrames) {
    doAcquisition = true;
    vecPixelsData.clear();
    long pixels_per_array = xtk_get_pixels_per_array(xtk_p);

    if (nFrames > 0) {
        for (int i = 0; i < nFrames; i++) {
            fkt_record(pixels_per_array, vecPixelsData);
        }
    }
    else {
        while (doAcquisition) {
            fkt_record(pixels_per_array, vecPixelsData);
        }
    }
}
```

Abbildung 4.50: Funktion *fkt\_acquire* der eigens entwickelten *Pipeinspection.dll*

Bei Verwendung der Funktion *fkt\_record* wird die Funktion *xtk\_get\_line* aus der DLL *xtk.dll* des Kameraherstellers aufgerufen. Die Funktion *xtk\_get\_line* dient zur Aufnahme eines Zeilenbildes von der TDI-Kamera. Bei der Evaluierung der Bildaufnahmen des Teststands wurde festgestellt, dass die ersten zwei Pixel am linken Bildrand keine Bildinformationen darstellen (siehe Kapitel 3.2.2). Aus diesem Aspekt werden die ersten zwei Pixel (beginnend bei 0) in der Funktion *xtk\_get\_line* vernachlässigt. Somit wird das Zeilenbild erst ab dem dritten Pixel (*iPix=2*) aufgenommen (siehe Abbildung 4.51).

```
void fkt_record(int pixels_per_array, vector<vector<unsigned short>> &vecPixelsData) {
    vector<unsigned short> currentPixel;
    unsigned short *PixelsData;
    if ((PixelsData = (unsigned short *)malloc(pixels_per_array * sizeof(unsigned
short))) == NULL) //Allokiert den Speicher zur Speicherung der Pixelwerte
    {
        printf("\nERROR: Failed to allocate memory for Pixels Data.\n");
    }

    if (xTk_get_line(xTk_p, PixelsData)) //Aufnahme eines Zeilenbildes
    {
        printf("\n\t%s\n", xTk_get_last_error_message(xTk_p));
    }
    for (int iPix = 2; iPix < pixels_per_array; iPix++) //Beginne erst ab Pixel 2
    {
        currentPixel.push_back(PixelsData[iPix]);
    }
    vecPixelsData.push_back(currentPixel);
    free(PixelsData);
}
```

Abbildung 4.51: Funktion *fkt\_record* der eigens entwickelten *Pipeinspection.dll*

Der Zugriff aus dem Steuerungsprogramm auf die DLL erfolgt in *LabVIEW* über den Funktionsblock *Call Library Function*. Dieser dient zum Aufruf der in der DLL enthaltenen Funktionen sowie der Übergabe von Funktionsparametern. Im Rahmen des umgesetzten Röntgensystems unter Anwendung der TDI-Kamera wird am Eingang des Funktionsblocks *Call Library Function* der Wert 0 als Übergabewert für den Parameter *nFrame* gesetzt. Somit macht die TDI-Kamera dauerhaft Zeilenaufnahmen bis sie durch die Funktion *fkt\_stopAcquisition* gestoppt wird.

#### ▪ Ablauf des Steuerungsprogramms während einer Röntgenaufnahme

Um eine Röntgenaufnahme durchführen zu können, müssen der Schrittmotor sowie die TDI-Kamera von dem Steuerungsprogramm angesteuert werden. Die Ansteuerung des Schrittmotors erfolgt durch die Schrittmotorsteuerung, die über die Kommunikationsschnittstelle RS485 angeschlossen ist. Die Ansteuerung der TDI-Kamera erfolgt über die DLLs *PipeInspection.dll* und *xTk.dll*. Der Programmablauf zwischen der Schrittmotorsteuerung, dem Steuerungsprogramm (Anwendercomputer) und der TDI-Kamera ist in Abbildung 4.52 dargestellt.

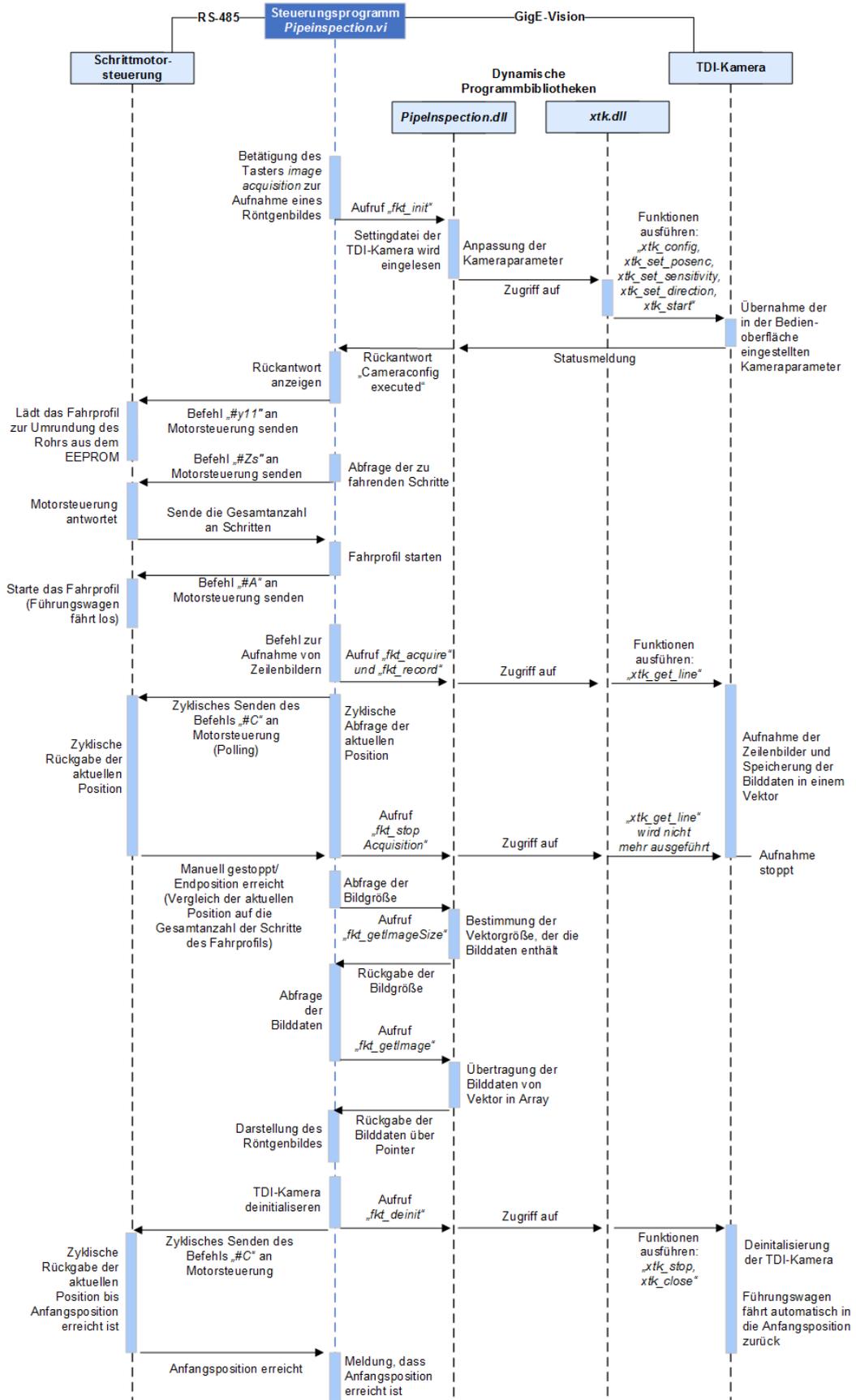


Abbildung 4.52: Ablauf des Steuerungsprogramms während einer Röntgenaufnahme

Bei der Betätigung des Tasters *image acquisition* wird der Case zur Abarbeitung einer Röntgenaufnahme ausgeführt. Dabei wird die Funktion *fkt\_init* der DLL *PipeInspection.dll* mit Hilfe des Funktionsblocks *Call Library Function* aufgerufen. Innerhalb der Funktion *fkt\_init* wird die Settingdatei *setting.xcf* eingelesen, die zum Laden der Standardparameter sowie zum Verbindungsaufbau der TDI-Kamera dient. Daraufhin werden vom Anwender die gewünschten Kameraparameter der Bedienoberfläche an die Kamera mittels der Hersteller-DLL *xkt.dll* übergeben. Sobald die Funktion *fkt\_init* erfolgreich abgearbeitet wurde, wird die Antwort „*Cameraconfig executed*“ als Datentyp String für den Anwender in der Bedienoberfläche angezeigt. Nach der Initialisierung der TDI-Kamera soll diese entlang der Bogenführung mit Hilfe des am Führungswagen montierten Schrittmotors bewegt werden. Vom Steuerungsprogramm wird der Befehl „#y11“ an die Motorsteuerung gesendet und damit das Profil zur Rundumfahrt in der Schrittmotorsteuerung aus dem EEPROM geladen. Das Senden der Befehle wird über die SubVI *ExecCmd.vi* durchgeführt. Anschließend werden die Gesamtanzahl der zu fahrenden Schritte des geladenen Fahrprofils mit dem Befehl „#Zs“ abgefragt und die Rückantwort der Motorsteuerung mit dem SubVI *ReadoutAnswer.vi* im Steuerungsprogramm eingelesen. Der Befehl „#A“ zum Starten des Führungswagens wird an die Schrittmotorsteuerung gesendet, wodurch sich der Schrittmotor in Bewegung setzt. Gleichzeitig wird die Funktion *fkt\_acquire* der DLL *PipeInspection.dll* aufgerufen, die zur Aufnahme von Zeilenbildern dient. Die Speicherung der Bilddaten erfolgt in einem Vektor, dessen Größe sich dynamisch an die jeweilige Anzahl der aufgenommenen Zeilenbilder anpasst. Es werden solange Zeilenbilder aufgenommen bis der Anwender die Aufnahme manuell stoppt oder die aktuelle Schrittzahl gleich der Gesamtanzahl an Schritten des Fahrprofils ist. Die Abfrage der aktuell gefahrenen Schrittzahl vom Steuerungsprogramm an die Schrittmotorsteuerung erfolgt durch das zyklische Senden des Befehls „#C“. Sobald die Gesamtschrittzahl des geladenen Fahrprofils gefahren wurde, wird die Funktion *fkt\_stopAcquisition* ausgeführt und beendet damit die Zeilenaufnahme. Um die Bilddaten auszulesen und dem Anwender als Bild darzustellen, muss die Bildgröße mit dem Funktionsaufruf von *fkt\_getImageSize* ermittelt werden. In dieser Funktion wird die Größe des Vektors, der die Bilddaten enthält, in x- und y-Richtung abgefragt. Durch die Erkenntnis der Vektorgröße werden über die Funktion *fkt\_getImage* die Bilddaten mittels eines Pointers aus dem Vektor ausgelesen, in ein Array überschrieben und als Rückgabewert an das Steuerungsprogramm übergeben. Die Bilddaten werden dem Anwender zur Darstellung angezeigt. Daraufhin wird der Befehl zur Deinitialisierung der TDI-Kamera über die Funktion *fkt\_deinit* aus der DLL *PipeInspection.dll* aufgerufen. Dies führt zu weiteren Funktionsaufrufen der Programmbibliothek des Kameraherstellers, welche zur Deinitialisierung der TDI-Kamera dienen. Das aus dem EEPROM geladene Fahrprofil der Motorsteuerung ist nach Erreichen der Endposition beendet. Anschließend wird automatisch ein weiteres Fahrprofil, das zur entgegengerichteten Bewegung des Führungswagens führt. Der Führungswagen fährt zu seiner Anfangsposition zurück. Dem Anwender wird nun die Statusmeldung angezeigt, dass sich der Führungswagen in der Anfangsposition befindet.

## 5 Auswertung des Röntgensystems

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet die Auswertung des konzipierten und umgesetzten Röntgensystems. In Kapitel 5.1 erfolgt die Bewertung der aufgenommenen Röntgenbilder und ihrer Qualität unter verschiedenen Aufnahmebedingungen. Eine Analyse des Fahrverhaltens des Führungswagens zur Umfahrung der TDI-Kamera um das zu prüfende Rohr wird in Kapitel 5.2 durchgeführt.

### 5.1 Bildqualität

Damit das Röntgensystem für die Prüfung von Schweißnähten zulässig ist, müssen gewisse Mindestanforderungen bezüglich der Bildqualität der Röntgenaufnahmen nachgewiesen werden. Die zu erreichenden Mindestanforderungen sowie das Verfahren zur Bestimmung der Bildgüte sind in den Normen ISO 10893-7 sowie ISO 17636-2 festgelegt. Die Mindestanforderungen unterscheiden sich in ihren Mindestanforderungen bezüglich der Bildqualität der Röntgenaufnahmen und untergliedern sich in die Bildgüteklassen A und B. Die Klasse A wird für Röntgenaufnahmen mit Standardempfindlichkeiten verwendet. Die Klasse B wird für erhöhte Empfindlichkeiten genutzt. Je höher die Empfindlichkeit ist, desto besser können kleine Fehlerstellen innerhalb der Schweißnaht detektiert werden. Um eine hohe Detailerkennbarkeit zu erreichen, ist die Bildgütekategorie B maßgebend für die Bewertung der Röntgenaufnahmen dieses Röntgensystems. [10, S. 8ff.]

Bei dem entwickelten Röntgensystem befinden sich die Rundstrahlröhre innerhalb und die TDI-Kamera außerhalb des zu prüfenden Rohres. Während der Röntgenaufnahme wird folglich eine einwandige Durchstrahlung durchgeführt und muss für die Bewertung der Bildqualität berücksichtigt werden. Die Bildaufnahmen zur Bewertung der Bildqualität werden mit einem Doppeldraht-BPK durchgeführt. Bei der Verwendung des Doppeldraht-BPKs kann die Bildgüte entweder in Verbindung mit einem Drahtsteg- oder mit einem Schritt/Loch-BPK geprüft werden, um mit diesen BPKs Bindefehler oder Risse innerhalb der Schweißnaht zu simulieren. Für die Fehlersimulation wird der Drahtsteg-BPK verwendet, der anders als der Doppeldraht-BPK, nur Einzeldrähte mit unterschiedlichen Durchmessern besitzt. Die BPKs werden für die Aufnahme der Röntgenbilder auf die Innenseite des zu prüfenden Rohres, folglich auf der Strahlenquelle zugewandten Oberfläche, befestigt. Eine Befestigung außerhalb des Rohres ist nur erlaubt, wenn die zur Strahlenquelle zugewandte Oberfläche unzugänglich ist [10, S. 11ff.].

Für die Erreichung der Bildgütekategorie B bei einwandiger Durchstrahlung und einer Wandstärke des Rohres von 5 mm müssen folgende Mindestanforderungen eingehalten werden. Bei dem Doppeldraht-BPK muss ein Mindest-BPK-Wert von D12 und bei dem Drahtsteg-BPK ein Mindest-BPK-Wert von W16 erreicht werden [10, S. 16]. Zudem muss das Röntgenbild ein normiertes Signal-Rausch-Verhältnis  $SNR_N$  von mindestens 100 dB aufweisen [11, S. 27]. Das normierte  $SNR_N$  berechnet sich aus dem gemessenen SNR,

einer Konstante 88,6  $\mu\text{m}$  sowie der Basis-Ortsauflösung  $SR_{b\_Image}$  des digitalen Bildes. [10, S. 12].

$$SNR_N = SNR \cdot \frac{88,6 \mu\text{m}}{SR_{b\_Image}} \quad (5.1)$$

Die Basis-Ortsauflösung des digitalen Bildes gibt das kleinste geometrische Detail an, welches in einem digitalen Bild aufgelöst werden kann und ist äquivalent zur Drahtstärke und zum Drahtabstand des Doppeldraht-BPKs [11, S. 8]. Die zu einem gemessenen BPK-Wert gehörende Basis-Ortsauflösungen sind in Tabelle 5.1 abgebildet.

**Tabelle 5.1: Äquivalente Darstellung der Basis-Ortsauflösung zum BPK-Wert [11, S. 47]**

BPK-Wert	Basis-Ortsauflösung ( $SR_{b\_Image}$ )
D13+	0,040 mm
D13	0,050 mm
D12	0,625 mm
D11	0,008 mm
D10	0,100 mm
D9	0,130 mm
D8	0,160 mm
D7	0,200 mm

Um das Röntgensystem sowie deren Röntgenaufnahmen bewerten zu können, wird das Röntgensystem mit unterschiedlichen Prüfparametern getestet. Eine Änderung der Spannungs- und Stromwerte der Rundstrahlröhre sowie die Änderung der Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera sollen als Einflussparameter auf die Qualität der Röntgenbilder analysiert werden.

Der Führungswagen wird mit Hilfe des Schrittmotors mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_{\text{Führungswagen}}$  entlang der Bogenführung bewegt. Durch die einstellbare Länge der Teleskopschienen, die zur Positionierung der TDI-Kamera über dem Rohr dienen, stellt sich die Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera  $v_{\text{TDI-Kamera}}$  nach Formel 5.2 ein.

$$v_{\text{Führungswagen}} = \frac{n_{\text{Motor}}}{\ddot{u}_G} \cdot U_{\text{Zahnrad}} = \frac{5 \frac{U}{\text{min}}}{8} \cdot 23,09 \text{ cm} = 14,43 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (5.2)$$

Bei einer eingestellten Drehgeschwindigkeit des Schrittmotors  $n_{\text{Motor}}$  von 5 U/min, einer Getriebeübersetzung  $\ddot{u}_G$  von 8 sowie einem Zahnradumfang  $U_{\text{Zahnrad}}$  von 23,09 cm ergibt sich eine Geschwindigkeit des Führungswagens von 14,43 cm/min. Die Geschwindigkeit der TDI-Kamera berechnet sich anhand der Formel 5.3.

$$v_{TDI-Kamera} = \frac{d_{Rohr}}{d_{Bogenführung}} \cdot v_{Führungswagen} \quad (5.3)$$

$$= \frac{101,3 \text{ cm}}{131,4 \text{ cm}} \cdot 14,43 \frac{\text{cm}}{\text{min}} = 11,12 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Bei einer Motordrehgeschwindigkeit von 5 U/min hat die TDI-Kamera eine Bewegungsgeschwindigkeit von 11,12 cm/min.

**Tabelle 5.2: Umrechnung der Geschwindigkeiten**

<b>Drehgeschwindigkeit des Motors</b> <i>n<sub>Motor</sub></i>	<b>Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera</b> <i>v<sub>TDI-Kamera</sub></i>
5 U/min	11,12 cm/min
10 U/min	22,25 cm/min
20 U/min	44,50 cm/min

Die Röntgenaufnahmen werden mit den in Tabelle 5.2 dargestellten Bewegungsgeschwindigkeiten der TDI-Kamera durchgeführt und analysiert. Als Strahlendosis für die Röntgenröhre werden verschiedene Spannungs- und Stromwerte eingestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ausschließlich eine maximale Spannung von 200 kV und eine maximale Stromstärke von 6,0 mA eingestellt werden können. Zudem darf die maximale Leistung der eingesetzten Rundstrahlröhre 750 W nicht übersteigen. Für die Spannungs- und Stromwerte der Röntgenröhre werden folgende Parameter eingestellt (siehe Tabelle 5.3) und darauf basierend Röntgenaufnahmen durchgeführt.

**Tabelle 5.3: Eingestellte Prüfparameter zur Aufnahme von Röntgenbildern**

<b>Prüfszenario</b>	<b>Spannung</b>	<b>Stromstärke</b>	<b>Leistung</b>
A	100 kV	6,0 mA	600 W
B	130 kV	5,7 mA	741 W
C	150 kV	5,0 mA	750 W
D	170 kV	4,4 mA	748 W
E	200 kV	3,7 mA	750 W

Die fünf Prüfszenarien A bis E werden in Kombination mit den verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten der TDI-Kamera aus Tabelle 5.2 für die Durchführung der Röntgenaufnahmen verwendet.

In Abbildung 5.1 ist beispielhaft eine Röntgenaufnahme mit den Prüfparametern aus dem Szenario D und einer Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera von 11,12 cm/min dargestellt. Die zwei BPKs sind deutlich zu erkennen.



Abbildung 5.1: Röntgenaufnahme bei Prüfszenario D mit  $v_{\text{TDI-Kamera}} = 11,12 \text{ cm/min}$

Bei einer Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera von 11,12 cm/min werden bei unterschiedlichen Prüfbedingungen folgende Ergebnisse erreicht (siehe Abbildung 5.2).

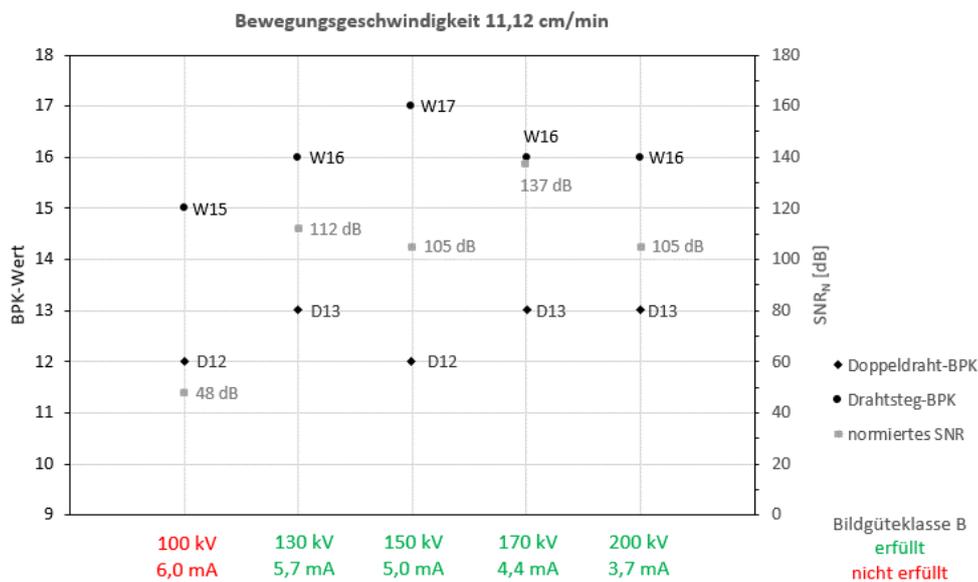
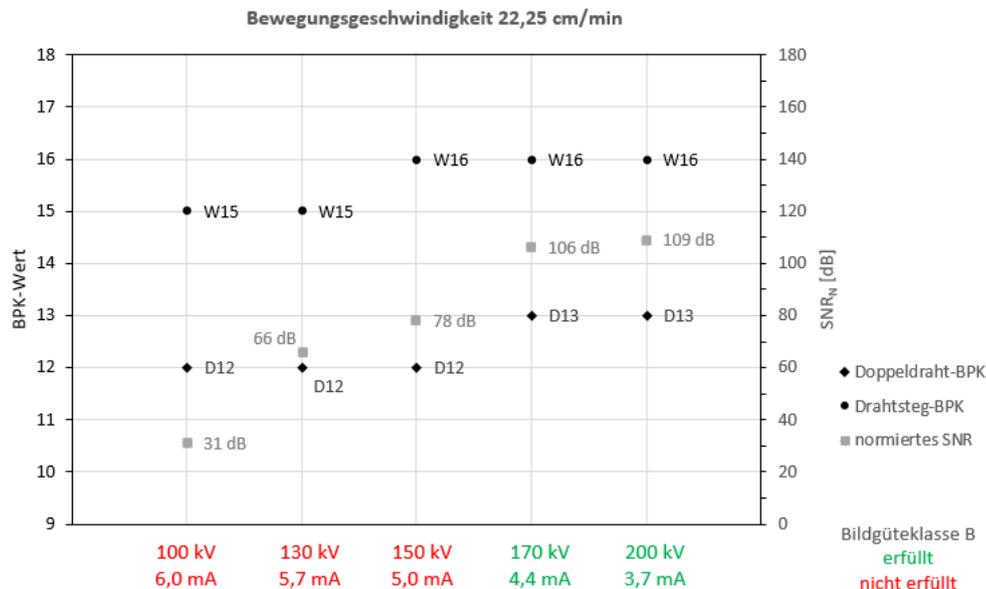


Abbildung 5.2: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei  $v_{\text{TDI-Kamera}} = 11,12 \text{ cm/min}$

Die Bildgüteklasse B wird bei einer Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera von 11,12 cm/min im Prüfszenario A (100 kV; 6,0 mA) nicht erreicht, da der  $\text{SNR}_N$ -Wert von 48 zu gering ist sowie der Drahtsteg nur bis W15 aufgelöst wird. Bei höheren Spannungen können die erforderlichen Mindestanforderungen für die Klasse B erfüllt werden, sodass das Röntgensystem für diese Prüfparameter geeignet ist.

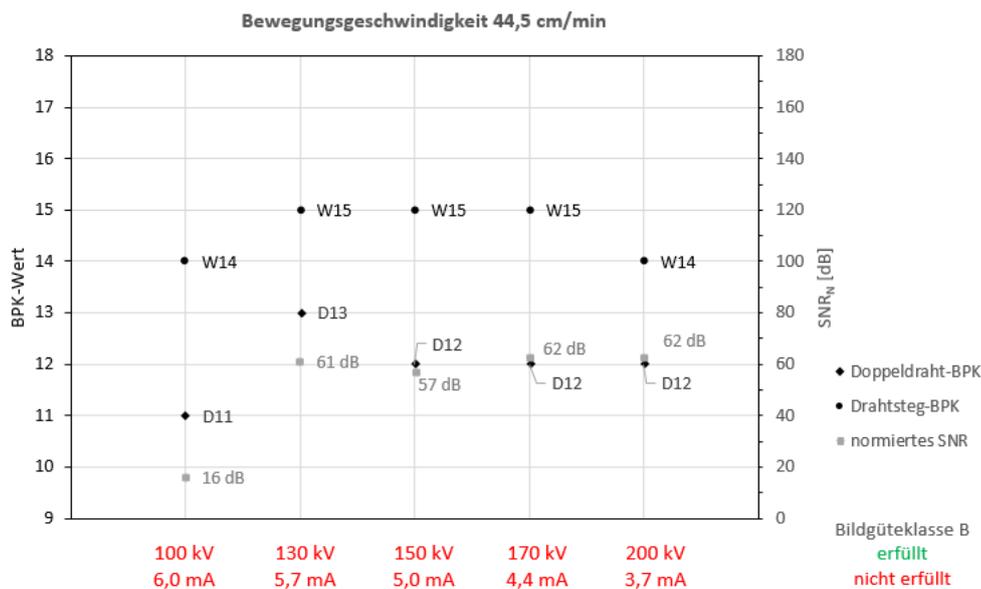
Im Nachfolgenden wird die Bewegungsgeschwindigkeit  $v_{\text{TDI-Kamera}}$  auf 22,25 cm/min eingestellt und die Röntgenaufnahmen bewertet. Die Ergebnisse aus der Bewertung sind in Abbildung 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.3: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei  $v_{\text{TDI-Kamera}} = 22,25$  cm/min**

Die durchgeführten Röntgenaufnahmen mit der TDI-Kamera verhalten sich bei einer Bewegungsgeschwindigkeit von 22,25 cm/min deutlich schlechter als bei 11,12 cm/min. Die Zeitspanne, in der der Szintillator die Strahlendosis für das Zeilenbild aufnehmen kann, verkürzt sich auf die Hälfte, sodass die Röntgenaufnahmen dunkler werden. Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, wird das SNR durch den Quotienten des mittleren Grauwertes zur Standardabweichung des Bildes definiert. Die Standardabweichung entspricht dem Rauschen des Bildes und bleibt annähernd konstant. Durch das dunklere Röntgenbild wird der mittlere Grauwert des Röntgenbildes geringer, wodurch sich das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und somit auch das normierte Signal-Rausch-Verhältnis ( $\text{SNR}_N$ ) verschlechtern.

Bei erneuter Verdoppelung der Prüfgeschwindigkeit auf 44,5 cm/min kann die Bildgüteklasse B bei keinem Prüfzenario erreicht werden (siehe **Abbildung 5.4**). Für die Erfüllung der Bildgüteklasse B gemäß der Norm DIN EN ISO 10893-7 ist das normierte Signal-Rausch-Verhältnis  $\text{SNR}_N$  zu gering. Ebenso wird bei dem Drahtsteg-BPK der Mindestwert von W16 nicht erreicht. Bei einer Spannung von 100 kV und einer Stromstärke von 6,0 mA kann zudem noch nicht einmal der Mindest-BPK-Wert von D12 des Doppeldraht-BPKs erreicht werden.



**Abbildung 5.4: Bewertung der Röntgenaufnahmen bei  $v_{\text{TDI-Kamera}} = 44,5 \text{ cm/min}$**

Mit Hilfe der Röntgenaufnahmen der BPKs konnte bewiesen werden, dass das Röntgensystem für die Bildprüfklasse B nur für Bewegungsgeschwindigkeiten der TDI-Kamera bis zu 22,25 cm/min verwendet werden darf. Höhere Geschwindigkeiten führen dazu, dass das normierte Signal-Rausch-Verhältnis  $\text{SNR}_N$  nicht den Mindestwert von 100 dB für die Bildgüteklasse B erreicht. Bei einer Zeilenaufnahme wird die auftreffende Strahlendosis auf dem Szintillator bei höheren Geschwindigkeiten zu gering, sodass der mittlere Grauwert des Röntgenbildes zu dunkel wird. Abhilfe würde eine Röntgenröhre mit einer höheren Strahlendosis bringen.

## 5.2 Fahrverhalten des Führungswagens

Der auf der Bogenführung parallel mitgeführte Encoder, dessen Signaltakt zur Aufnahme der Zeilenbilder dient, ermöglicht die Unabhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit des Führungswagens von der Aufnahmegeschwindigkeit der TDI-Kamera. Geschwindigkeitsänderungen des Führungswagens führen dadurch nicht zu verzerrten Röntgenaufnahmen.

Eine Analyse des Fahrverhaltens des Führungswagens muss dennoch durchgeführt werden, um Bewegungsschwankungen aufgrund verschieden wirkender Kräfte auf den Führungswagen zu berücksichtigen. Aufgrund der variabel einstellbaren Höhe der TDI-Kamera mit Hilfe der Teleskopschienen können bereits leichte Bewegungsschwankungen zum Aufschwingen der TDI-Kamera führen. Aus diesem Grund muss das in Kapitel 4.3.1 ausgelegte Antriebssystem einen möglichst guten Rundlauf des Führungswagens um das zu prüfende Rohr aufweisen. Um Geschwindigkeitsschwankungen feststellen zu können, wird mit Hilfe der Software *NanoPro* des Motorherstellers *Nanotec* das Fahrverhalten des Motors aufgenommen.

Zur Bewertung des Rundlaufs werden die aktuelle Rotorlage (Ist-Position) sowie die Schrittpulsvorgabe der Motorsteuerung (Soll-Position) mit einer Abtastrate von 20 ms aufgenommen. Eine Abweichung der Ist-Position von der Soll-Position wird Schleppfehler genannt [16, S. 134]. Zur Analyse des Fahrverhaltens des Führungswagens wird ein Bewegungsprofil mit 4.500 Schritten in Vorwärtsrichtung (positive Schritte) erstellt. 4.500 Schritte entsprechen einer Strecke von 32,47 cm auf der Bogenführung. Die Berechnung dieser zurückgelegten Strecke wird im Nachfolgenden erläutert.

Die Motorsteuerung sendet an den Schrittmotor elektronische Signale, die zur mechanischen Umdrehung des Schrittmotors und somit zur Drehung des Zahnrades führen. Der Motor wird im Halbschritt-Modus und einer Schrittweite von  $1,8^\circ$  betrieben. Durch den Halbschritt-Modus werden pro Schrittweite zwei Impulse von der Motorsteuerung als Steuerimpuls an den Schrittmotor gesendet. Für eine gesamte Umdrehung des Rotors werden demnach 400 Impulse benötigt, die zur Ausführung von 400 Schritten führen. Bei einem Fahrprofil zur Prüfung des Fahrverhaltens des Führungswagens mit einer Anzahl von 4.500 Schritten werden von der Motorwelle 11,25 Umdrehungen durchgeführt.

$$N_{Motorwelle} = \frac{4.500 \text{ Schritte}}{400 \frac{\text{Schritte}}{\text{Umdrehung}}} = 11,25 \text{ Umdrehungen} \quad (5.4)$$

Das auf dem Zahnkranz bewegte Zahnrad dreht sich jedoch aufgrund des zwischengeschalteten Getriebes mit einer Übersetzung von  $\ddot{u}_G$  von 8 nur 1,40625 Mal. Wird dieser Wert mit dem Umfang des Zahnrades von 23,091 cm multipliziert, entspricht es dem Wert der zurückgelegten Strecke des Führungswagens  $s_{Fahrprofil}$  auf der Bogenführung bei einem Fahrprofil von 4.500 Schritten.

$$s_{Fahrprofil} = \frac{N_{Motorwelle}}{\ddot{u}_G} \cdot U_{Zahnrad} \quad (5.5)$$

$$s_{Fahrprofil} = \frac{11,25 \text{ Umdrehungen}}{8} \cdot 23,091 \text{ cm} = 32,47 \text{ cm}$$

Die durchgeführten Röntgenaufnahmen wurden in Kapitel 5.1 mit Drehgeschwindigkeiten des Schrittmotors zwischen 5 U/min und 20 U/min analysiert und bewertet. Auf Basis dieser Geschwindigkeiten wird auch die Auswertung des Fahrverhaltens durchgeführt. Bei einer Umrundung des Rohres wirken unterschiedliche Kräfte auf den Führungswagen, sodass der Schrittmotor unterschiedliche Drehmomente aufbringen muss. Diese verschiedenen Belastungen müssen für die Bewegungsanalyse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die Bewegung des Führungswagens auf der Bogenführung in horizontaler und vertikaler Lage analysiert (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6).

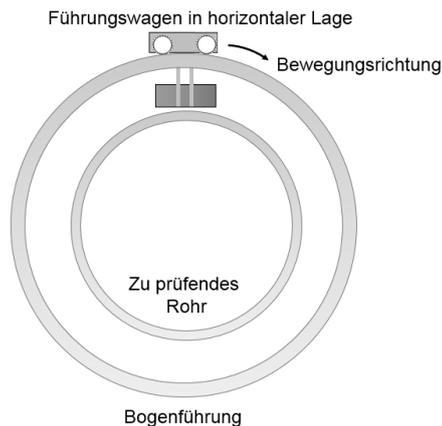


Abbildung 5.5: Führungswagen in horizontaler Lage auf der Bogenführung

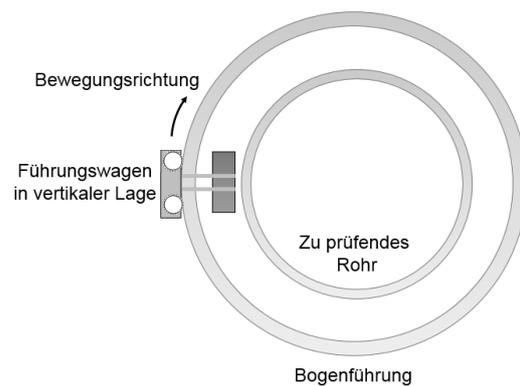


Abbildung 5.6: Führungswagen in vertikaler Lage auf der Bogenführung

In den folgenden Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.10 werden die vom Schrittmotor durchgeführten Schritte in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Zudem wird der Schleppfehler in positiver oder negativer Schrittrichtung dargestellt. Ein positiver Schleppfehler stellt einen Vorlauf der Ist-Position zur Soll-Position dar. Hingegen stellt ein negativer Schleppfehler eine nachteilige Ist-Position zur Soll-Position dar. In der Abbildung 5.7 ist das Fahrprofil bei einer Drehgeschwindigkeit von 5 U/min in horizontaler Lage auf der Bogenführung dargestellt. Mit einer Bewegungsgeschwindigkeit des Führungswagens von 14,43 cm/min (siehe Formel 5.2) wird die Strecke von 32,47 cm innerhalb einer Zeit von 136 Sekunden zurückgelegt.



Abbildung 5.7: Fahrverhalten des Motors mit  $n_{\text{Motor}} = 5 \text{ U/min}$  in horizontaler Lage

Das Fahrverhalten des Schrittmotors verhält sich bei einer Drehgeschwindigkeit von 5 U/min und einer horizontalen Fahrt konstant. Die Ist-Position pendelt zwischen der Soll-Position mit einer maximalen Abweichung von einem Schritt. Dies entspricht einem Versatz der Wegstrecke von 72,16  $\mu\text{m}$  zur Soll-Position, die sich aus der Wegstrecke des Fahrprofils  $s_{\text{Fahrprofil}}$  und der Anzahl der zurückgelegten Schritte des Fahrprofils berechnet.

$$\text{Versatz} = \frac{s_{\text{Fahrprofil}}}{\text{Anzahl d. Fahrprofilschritte}} = \frac{32,47 \text{ cm}}{4.500 \text{ Schritte}} = 72,16 \frac{\mu\text{m}}{\text{Schritt}} \quad (5.6)$$

In Abbildung 5.8 ist das Fahrprofil mit 5 U/min in vertikaler Lage ausgewertet. In diesem Fall muss der Schrittmotor das höchste Drehmoment aufbringen, um den Führungswagen um das Rohr zu bewegen.

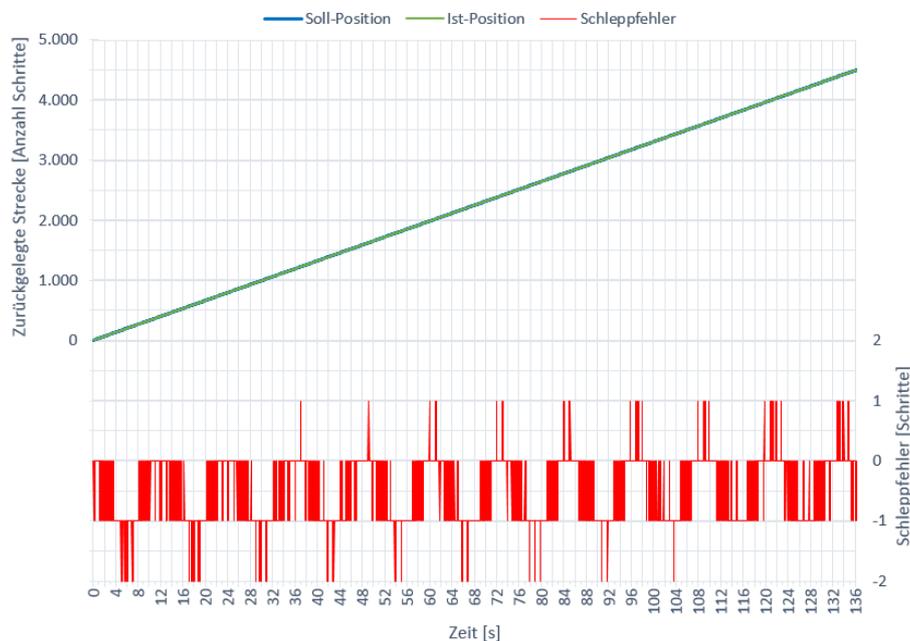


Abbildung 5.8: Fahrverhalten des Motors mit  $n_{\text{Motor}} = 5 \text{ U/min}$  in vertikaler Lage

Das Fahrverhalten in vertikaler Lage ist trotz der stark einwirkenden Hangabtriebskraft  $F_N$  ähnlich wie in der horizontalen Lage. Jedoch tritt hier ein maximaler Schleppfehler von zwei Schritten auf. Diese Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Position treten in dem Zeitfenster zwischen vier und sechs Sekunden am meisten auf.

In Abbildung 5.9 wird das Fahrverhalten mit einer Drehgeschwindigkeit des Schrittmotors  $n_{\text{Motor}}$  von 20 U/min dargestellt und analysiert. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Führungswagens  $v_{\text{Führungswagen}}$  berechnet sich nach der Formel 5.2 und beträgt 57,73 cm/min. Dadurch kann die untersuchte Wegstrecke des Führungswagens von 32,47 cm innerhalb einer Zeit von 33,75 Sekunden zurückgelegt werden.

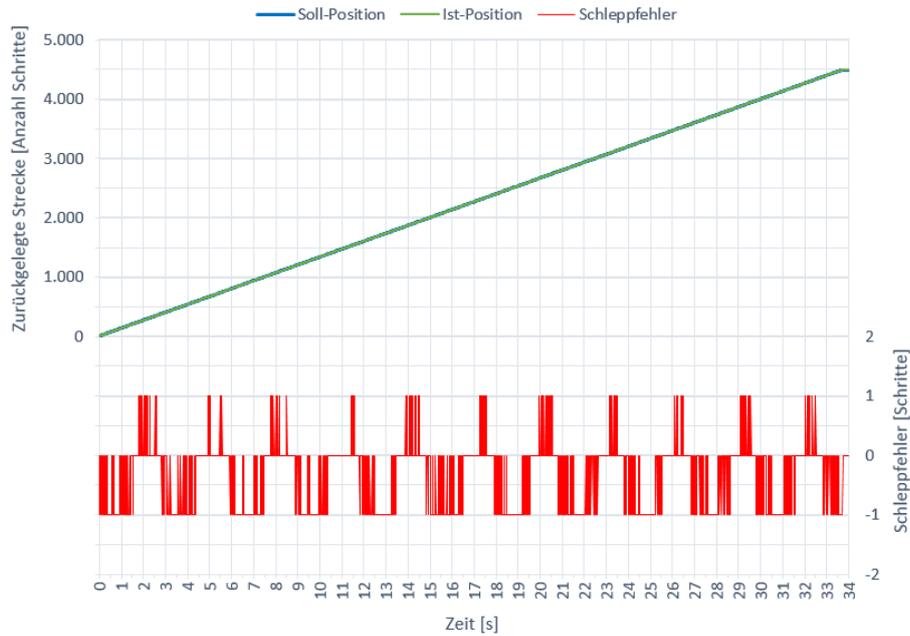


Abbildung 5.9: Fahrverhalten des Motors mit  $n_{\text{Motor}} = 20 \text{ U/min}$  in horizontaler Lage

Der Führungswagen wird in der horizontalen Lage mit Schleppfehlern von maximal einem Schritt entlang der Bogenführung bewegt. Werden die Geschwindigkeiten von 5 U/min und 20 U/min in horizontaler Lage verglichen, sind keine Unterschiede erkennbar.

Bei der vertikalen Lage des Führungswagens sowie einer Motordrehgeschwindigkeit von 20 U/min treten im Gegensatz zur horizontalen Lage stärkere Schleppfehler auf. Dieses zeigt die Abbildung 5.10.

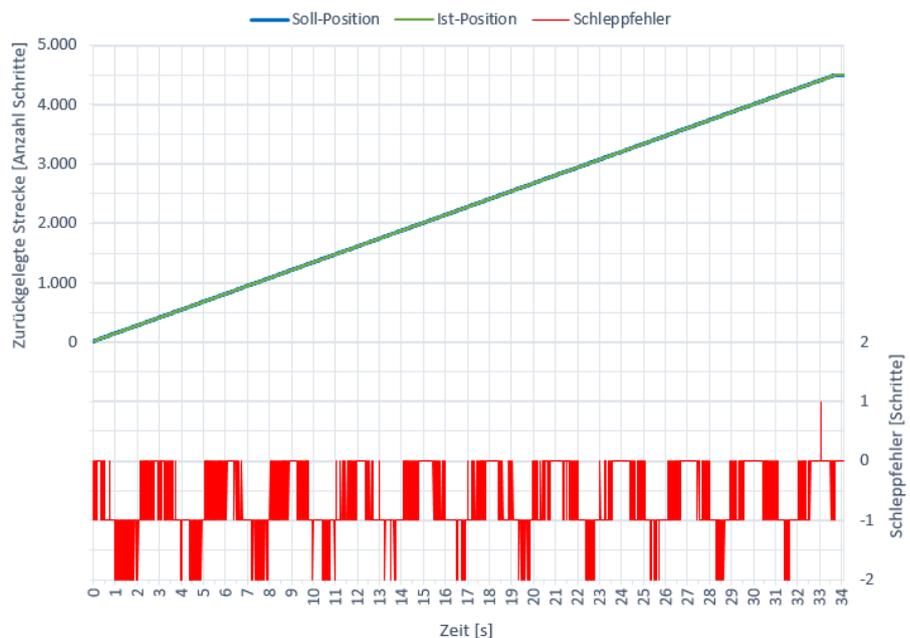


Abbildung 5.10: Fahrverhalten des Motors mit  $n_{\text{Motor}} = 20 \text{ U/min}$  in vertikaler Lage

Die Ist-Position eilt der Soll-Position mit einer maximalen Schrittdifferenz von zwei Schritten nach. Die meisten Abweichungen sind zu Beginn ersichtlich, also in dem Bereich, in dem sich der Führungswagen in vertikaler Lage befindet. Während der Fahrt aufwärts der Bogenführung wird die Steigung geringer, sodass dadurch eine geringere Hangabtriebskraft auf den Führungswagen wirkt. Diese Kraftänderung wirkt sich positiv auf den Schleppfehler aus, sodass weniger Schleppfehler auftreten.

Das Fahrverhalten des Schrittmotors hat gezeigt, dass das ausgewählte Antriebssystem für die Motordrehgeschwindigkeit von 5 U/min bis 20 U/min einen maximalen Schleppfehler von zwei Schritten aufweist. Das Auftreten der Schleppfehler wird jedoch durch die Motorsteuerung korrigiert, wodurch die Ist-Position des Schrittmotors der Soll-Position sehr gut folgen kann. Dadurch liegen die in den Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.10 erkennbaren Linien der Ist-Position annähernd auf den Linien der Soll-Position. Abweichungen von einander sind mit bloßen Auge schwer erkennbar. Aus diesem Grund wurden die Schleppfehler berechnet und separat auf den Abbildungen dargestellt. Durch die auftretenden Schleppfehler von maximal zwei Schritten, die einem Versatz der Wegstrecke von 144,32  $\mu\text{m}$  entsprechen, wird der Rundlauf des angetriebenen Führungswagens für gut befunden. Es entstehen keine ersichtlichen Schwingungen während der Röntgenaufnahme.

## 6 Fazit und Ausblick

Um die Bildaufnahme von Rundschweißnähten effizienter als bei existierenden analogen Röntgenfilmen oder digitalen Flächendetektoren zu realisieren, wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Röntgensystem unter Einsatz einer TDI-Kamera entwickelt und umgesetzt. Die TDI-Kamera ermöglicht die digitale zeilenweise Aufnahme einer Rundschweißnaht eines Rohres in einem einzigen Röntgenbild – unabhängig von der Länge der Rundschweißnaht. Die aufgenommenen Röntgenbilder der Schweißnähte können direkt auf einem mit der TDI-Kamera verbundenen Anwendercomputer betrachtet und bewertet werden.

Die Funktionalität der TDI-Kamera wurde im Rahmen eines Teststands analysiert, um die benötigten Hardwarekomponenten basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen optimal auszuwählen. Zusätzlich konnten im Teststand erste programmtechnische Erkenntnisse über die vom Kamerahersteller mitgelieferten Dateien für die TDI-Kamera erlangt werden. Auf Basis der entwickelten C/C++-Konsolenanwendung wurden die Funktionen zur Ansteuerung der TDI-Kamera sowie zur Kalibrierung der durchgeführten Röntgenbilder getestet. Diese Anwendung diente als Basis der zu entwickelten DLL für das Steuerungsprogramm des Röntgensystems. Mit der Evaluierung der Bildaufnahmen im Teststand konnten erste Aussagen über die Bildqualität getroffen und Rückschlüsse auf die TDI-Kamera sowie ihrer Nutzung gezogen werden.

Im umgesetzten Röntgensystem wurde zur Synchronisierung der Aufnahmefrequenz der TDI-Kamera mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Führungswagens ein programmierbarer Inkremental-Encoder gewählt, dessen Ausgangstakt als Taktsignal für die TDI-Kamera dient. Zur Anpassung der Encoderauflösung an den jeweiligen Rohrdurchmesser wurde eine geeignete Schnittstelle zur Kommunikation zwischen dem Anwendercomputer und dem Encoder entwickelt. Dazu wurde ein Mikrocontroller mit einem RS485-Shield ausgesucht, der die Umsetzung des Kommunikationsprotokolls von USB auf RS485 ausübt. Im Rahmen des Antriebssystems zur Bewegung der TDI-Kamera um das Rohr wurden ein Schrittmotor mit einem zusätzlichen Getriebe und einer Sicherheitsbremse verwendet. Das Röntgensystem wurde für den Einsatz in einer Strahlenschutzkabine konzipiert und umgesetzt.

Damit das Röntgensystem zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung genutzt werden darf, müssen die geltenden Normen eingehalten werden. Bei der Analyse der Qualität der Röntgenaufnahmen wurde festgestellt, dass das entwickelte Röntgensystem mit der gegebenen Rundstrahlröhre ausschließlich bis zu einer Bewegungsgeschwindigkeit der TDI-Kamera von 22,25 cm/min genutzt werden darf, um die Bildgüteklasse B gemäß der geltenden Normen erreichen zu können.

Als Fazit der Arbeit kann grundlegend festgehalten werden, dass der Einsatz einer TDI-Kamera in einem Röntgensystem für Aufnahme von Rundschweißnähten an Rohren möglich ist. Ob die Röntgenaufnahmen mit der TDI-Kamera am Ende eine bessere Bildqualität als herkömmliche Systeme liefern, kann an dieser Stelle nicht bewertet werden. Hierzu ist ein separater Vergleich mit anderen Röntgensystemen notwendig. Eine betriebswirtschaftliche Kostenbetrachtung könnte an dieser Stelle in die Analyse mit den zu vergleichenden Systemen einfließen.

Des Weiteren könnte das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und umgesetzte Röntgensystem bezüglich seiner Mobilität optimiert werden. Aktuell wird zur Positionierung der Bogenführung samt TDI-Kamera um das zu prüfende Rohr mindestens eine kleine Hebevorrichtung benötigt, die das Gewicht von rund 215 kg für das Gesamtsystem bewegen kann. Dabei beträgt allein das Gewicht der von *HepcoMotion* erworbenen Bogenführung 187 kg. Zudem ist die TDI-Kamera laut Herstellerangaben nur staubdicht, nicht aber wasserfest. Somit ist im Rahmen des Röntgensystems die TDI-Kamera nicht gegen das Eindringen von Wasser geschützt. Ein Außeneinsatz wird nur mit einem zusätzlichen Gehäuse um die TDI-Kamera sowie deren elektrische Anschlüsse empfohlen. Auch ist eine Umstellung des Röntgensystems für die Nutzung im Außeneinsatz von einer Einspeisung von 230 V Wechselspannung auf einen Batteriebetrieb ratsam.

Ein entscheidender Schritt ist die Erkennung von Fehlerstellen in der Rundschweißnaht anhand der Röntgenbilder. Im konzipierten und umgesetzten Röntgensystem erfolgt diese Auswertung der Röntgenbilder durch den Anwender am Monitor. Möglicherweise können durch eine automatische Bildverarbeitung und -auswertung verborgene innere Unregelmäßigkeiten und Lufteinschlüsse effizienter erkannt werden.

Um einen internationalen Einsatz des Röntgensystems zu ermöglichen, ist es ratsam die Bedienoberfläche zur Steuerung für unterschiedliche Sprachen auszulegen. Die Funktionalität der Mehrsprachigkeit könnte zukünftig implementiert werden.

Die durch diese Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über das praktisch umgesetzte Röntgensystem ermöglichen der VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH das Erschließen neuer Geschäftsfelder zur Prüfung von Rundschweißnähten an Rohren.

## Literaturverzeichnis

- [1] Duschl, Dieter: *Softwareentwicklung mit C++ – Einführung mit Visual Studio 2012*. 1. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 – ISBN: 978-3-658-01585-5
  
- [2] Erhard, Angelika: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung – Grundlagen, Systeme und Anwendung*. 1. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2008 – ISBN: 978-3-519-00478-3
  
- [3] Georgi, Wolfgang; Metin, Ergun: *Einführung in LabVIEW*. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag München, 2012 – ISBN: 978-3-446-42859-1
  
- [4] Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert: *Sensoren in Wissenschaft und Technik – Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 1. Auflage, Vieweg und Teubner GmbH & Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012 – ISBN: 978-3-8348-0169-2
  
- [5] Hirsch, Andreas: *Werkzeugmaschinen – Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016 – ISBN: 978-3-658-14248-3
  
- [6] Krieger, Hanno: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. 2. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 – ISBN: 978-3-658-00589-0
  
- [7] Louis, Dirk: *C/C++ Kompendium*. 1. Auflage, Markt+Technik Verlag GmbH, München, 1998 – ISBN: 3-8272-5386-1
  
- [8] Mansius, Reinhard: *Praxisbuch Antriebsauslegung*. 1. Auflage, Vogel Buchverlag, 2012 – ISBN: 978-3-8343-3247-9
  
- [9] Norm – ASTM E 2597-07: *Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays*
  
- [10] Norm – DIN EN ISO 10893-7:2011-07: *Zerstörungsfreie Prüfung von Stahlrohren, Teil 7: Digitale Durchstrahlungsprüfung der Schweißnaht geschweißter Stahlrohre zum Nachweis von Unvollkommenheiten*
  
- [11] Norm – DIN EN ISO 17636-2:2013: *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlungsprüfung, Teil 2: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit digitalen Detektoren*

- [12] Norm – DIN 54113-1:2005-04: *Zerstörungsfreie Prüfung – Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV*, Teil 1: Allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen
- [13] Norm – DIN ISO 54113-3 Bbl 1:2005-04: *Zerstörungsfreie Prüfung – Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV*, Teil 3: Formeln und Diagramme für Strahlenschutzberechnungen; Abschätzen von Kontrollbereichen
- [14] Patent: *Verfahren zur Kalibrierung eines digitalen Röntgendetektors und zugehörige Röntgenvorrichtung* – Patent DE 10343787 B4
- [15] Purschke, Matthias: *Die Röntgenprüfung – Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung*. Band 7, Castell-Verlag Wuppertal, 2001 – ISBN: 3-934-255-07-8
- [16] Rummich, Erich: *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe – Funktionsprinzip – Betriebseigenschaften – Messtechnik*. 4. Auflage, Expert-Verlag Renningen, 2007 – ISBN: 978-3-8169-2749-5
- [17] Schiebold, Karlheinz: *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Durchstrahlungsprüfung*. 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015 – ISBN: 978-3-662-44669-0
- [18] Steeb, Siegfried: *Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung*. 4., aktualisierte Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2011 – ISBN: 978-3-8169-2852-2
- [19] Sick AG: *Programmierbefehle des Encoders DFS60BS4PC10000* – internes Dokument: programmierbefehle.pdf
- [20] Vogt, Hans-Gerrit: *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*. 6., überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2011 – ISBN: 978-3-446-42593-4
- [21] Weckenmann, Albert: *Koordinatenmesstechnik – Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. 2., vollständige überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2012 – ISBN: 978-3-446-40739-8

- [22] Weidauer, Jens: *Elektrische Antriebstechnik*. 3., überarbeitende Auflage, Verlag Publicis, Erlangen, 2013 – ISBN: 978-3-89578-431-6
- [23] Willemer, Arnold: *Einstieg in C++*. 1. Auflage, Galileo Press GmbH, Bonn, 2003 – ISBN: 3-89842-397-2
- [24] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „Quickstart“* – internes Dokument: *XTI12848-xxx-Quick\_Start.pdf*
- [25] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „Demo Manual“* – internes Dokument: *Kamerahandbuch X88 Demo-Manual\_v1p6.pdf*
- [26] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „xti12848“* – internes Dokument: *xti12848-rev1p3.pdf*
- [27] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „Hardware Manual“* – internes Dokument: *Manual v1p1.pdf*
- [28] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „SDK-Manual“* – internes Dokument: *XIC SDK-Manual\_v1p8.pdf*
- [29] X-Scan Imaging Corporation: *Handbuch TDI-Kamera „Position Encoder“* – internes Dokument: *Position Encoder\_v1p0.pdf*
- [30] YXLON International GmbH: *Handbuch Rundstrahlröhre EVO-200D* – internes Dokument

## Internetquellen

- [31] Arduino Mega 2560 REV3: Overview  
URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega>  
Aufruf: 24.08.2017
- [32] Better Bankside: Trayport  
<http://www.betterbankside.co.uk/businesses/trayport>  
Aufruf: 12.11.2017
- [33] CCD-Zeilenkamera: Monochrom-, Color- und TDI-Systeme  
URL: [https://www.sukhamburg.com/download/art\\_PC-Ind\\_09-08.pdf](https://www.sukhamburg.com/download/art_PC-Ind_09-08.pdf)  
Aufruf: 08.01.2018
- [34] Department Mathematik und Informationstechnologie – Lehrstuhl für Angewandte Mathematik: Elektrische Antriebstechnik, Getriebe  
URL: [http://institute.unileoben.ac.at/etechnik/Ger/Lehre\\_G/Skripten\\_G/Files\\_G/EI\\_Antriebst/C\\_Getriebe\\_Ubersetzung\\_Wirkungsgrad.pdf](http://institute.unileoben.ac.at/etechnik/Ger/Lehre_G/Skripten_G/Files_G/EI_Antriebst/C_Getriebe_Ubersetzung_Wirkungsgrad.pdf)  
Aufruf: 22.06.2017
- [35] HAW-Hamburg: Skript Massenträgheitsmoment und Drehfederkonstante  
URL: [https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/TI-MP/Institute/MB-EuK/IMM/Massentraegheit.pdf](https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-MP/Institute/MB-EuK/IMM/Massentraegheit.pdf)  
Aufruf: 08.12.2017
- [36] Heise: 10 Gigabit pro Sekunde über Kupfer  
URL: <https://www.heise.de/ct/artikel/10-Gigabit-pro-Sekunde-ueber-Kupfer-221773.html>  
Aufruf: 02.01.2018
- [37] Maxon Motor AG: Formelsammlung, Jan Braun  
URL: [https://www.maxonmotor.de/medias/sys\\_master/root/8819062800414/maxon-Formelsammlung-d.pdf?attachment=true](https://www.maxonmotor.de/medias/sys_master/root/8819062800414/maxon-Formelsammlung-d.pdf?attachment=true)  
Aufruf: 17.06.2017
- [38] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: Schrittmotor – ST6018D4508-B  
URL: <https://de.nanotec.com/produkte/563-st6018d4508-b/>  
Aufruf: 20.06.2017

- [39] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: Präzisionsplanetengetriebe – GPLE60-1S-8  
URL: <https://de.nanotec.com/produkte/871-gple60-1s-8/>  
Aufruf: 20.06.17
- [40] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: Bremse – Brake-BKE-2,0-6,35  
URL: <https://de.nanotec.com/produkte/1163-brake-bke-20-635/>  
Aufruf: 20.06.2017
- [41] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: 3-Kanal-Encoder/Drehgeber – WEDL5541-A06  
URL: <https://de.nanotec.com/produkte/258-wedl5541-a06-635-mm/>  
Aufruf: 20.06.2017
- [42] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: Closed-Loop-Schrittmotorsteuerung – SMC147-S-2  
URL: <https://de.nanotec.com/produkte/1045-smci47-s-2/>  
Aufruf: 20.06.2017
- [43] Nanotec Electronic GmbH & Co KG: Handbuch Schrittmotorsteuerung Befehlssätze  
URL: [https://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Programmierung/Programmierhandbuch\\_V2.7.pdf](https://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Programmierung/Programmierhandbuch_V2.7.pdf)  
Aufruf: 02.09.2017
- [44] National Instrument: LabVIEW Handbuch – Erste Schritte mit LabVIEW, Ausgabe Juni 2003, Artikelnummer 323587A-01  
URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/323587a.pdf>  
Aufruf 13.06.2017
- [45] National Instrument: LabVIEW – Importieren von Funktionen aus einer DLL  
URL: [http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/371361H-0113/lvhowto/import\\_shared\\_library/](http://zone.ni.com/reference/de-XX/help/371361H-0113/lvhowto/import_shared_library/)  
Aufruf: 25.01.2018
- [46] SICK AG: Encoderhandbuch – DFS60BS4PC10000.pdf  
URL: [https://www.sick.com/media/docs/5/25/625/Product\\_information\\_DFS60\\_Incremental\\_Encoders\\_de\\_IM0022625.PDF](https://www.sick.com/media/docs/5/25/625/Product_information_DFS60_Incremental_Encoders_de_IM0022625.PDF)  
Aufruf: 26.07.2017

- [47]** Stemmer Imaging: GigE Vision  
URL: <https://www.stemmer-imaging.de/de/grundlagen/gige-vision/>  
Aufruf: 09.01.2018

## **Anhang**

### **Anhang A1: Antriebsauslegung**

Der Ordner „Antriebsauslegung“ enthält die für die Antriebsauslegung benötigten Berechnungen.

### **Anhang A2: CAD-Zeichnungen**

Der Ordner „CAD-Zeichnungen“ enthält 3D-Modelle des konzipierten und umgesetzten Röntgensystems. Diese 3D-Modelle wurden von den Konstrukteuren der Firma VisiConsult X-ray Systems and Solutions GmbH auf Basis meiner Überlegungen durchgeführt.

### **Anhang A3: C-Code**

Der Ordner „C-Code“ enthält den Quellcode für die entwickelte C/C++-Konsolenanwendung des Teststands.

### **Anhang A4: DLL**

Der Ordner „DLL“ enthält die selbstentwickelte DLL zur Steuerung der TDI-Kamera.

### **Anhang A5: Fahrverhalten**

Der Ordner „Fahrverhalten“ enthält das mit der Schrittmotorsteuerung aufgenommene Fahrprofil zur Analyse des Fahrverhaltens des Führungswagens.

### **Anhang A6: LabVIEW**

Der Ordner „LabVIEW“ enthält das Programm zur Steuerung des konzipierten und umgesetzten Röntgensystems aus der Entwicklungsumgebung *LabVIEW*.

### **Anhang A7: Mikrocontroller**

Der Ordner „Mikrocontroller“ enthält den für den *Arduino Mega* geschriebenen Quellcode zur Kommunikation zwischen dem Anwendercomputer und dem Inkremental-Encoder.

Die Anhänge A1 bis A7 sind in elektronischer Form auf einer DVD abgelegt und beim Prüfer Prof. Dr.-Ing. U. Meiners einzusehen.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift