



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Diplomarbeit

Marco Toaldo

**Ermittlung der Störgrößen und deren
Einfluss auf die Genauigkeit bei der Montage
von Linearführungen an Schleifmaschinen**

Fachbereich Maschinenbau und Produktion

Erstprüfer:

Prof. Dr. Claus-Dieter Pries

Zweitprüfer:

Dipl. Ing. Burkhard Becker

Bearbeitungszeitraum:

01. Juni 2011 bis 31. August 2011

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Aufgabenstellung zur Diplomarbeit

Schleifmaschinen sind hochgenaue Werkzeugmaschinen. Bei der Produktion sind deshalb häufig kostspielige genauigkeitsverbessernde Nacharbeiten erforderlich. Fertige Schleifmaschinen bestehen gelegentlich nicht die Endabnahmeprüfung. Als Besonders fehlerverursachend erweist sich die Montage der Linearführungen. Deren Formabweichungsfehler führen im Fertigungsprozess sehr häufig zu Problemen.

Im Rahmen einer Diplomarbeit sollen Einflüsse und Störgrößen auf die geometrische Genauigkeit der Schleifmaschine untersucht und das Verfahren der Produktion in den wesentlichen Punkten analysiert und bewertet werden.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	2
Aufgabenstellung zur Diplomarbeit.....	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	8
Vorwort.....	9
1 Überblick	10
1.1 Erläuterung des Schleifverfahren	10
1.2 Beschreibung der untersuchten Schleifmaschinen	10
1.3 Problematik der Nacharbeit	12
1.4 Vorgehensweise bei der Diplomarbeit	15
2 Begriffsklärungen	16
2.1 Formelzeichen und Abkürzungen.....	16
2.2 Aufbau der Schleifmaschine.....	17
2.3 Maschinenbett.....	19
2.4 Linearführungen	21
2.5 Form- und Lagetoleranzen	23
2.5.1 Geradheitstoleranz	23
2.5.2 Ebenheitstoleranz	23
3 Messverfahren.....	25
3.1 Elektronische Neigungswaage.....	25
3.1.1 Technische Funktionsweise der elektronischen Neigungswaage.....	26
3.1.2 Messverfahren der elektronischen Neigungswaage	27
3.1.3 Vermessung von Linien mit Twist	29
3.1.4 Verfahren zur Ausrichtung des Graphen.....	31
3.1.5 Störfaktoren bei Messungen mit der elektronischen Neigungswaage.....	36
3.2 Das Autokollimationsverfahren.....	40
3.3 Inkrementaler Messtaster.....	43
3.4 Laserinterferometer	44
3.4.1 Prüfung der Einsatztauglichkeit eines Laserinterferometersystems der Firma Renishaw	46
3.4.2 Allgemeine Genauigkeit des Messverfahrens	48

3.4.3	Überprüfung der Genauigkeit des Messverfahrens	48
4	Montageablauf	51
4.1	Ausrichtung des Maschinenbettes	51
4.2	Anpassung der Führungsschienen an das Maschinenbett	51
4.3	Montage der X-Achsen Linearführungen.....	52
4.4	Montage der Y-Achsen Linearführungen.....	56
4.5	Montage der Z-Achsen Linearführungen	56
5	Bewertung der aktuellen Messverfahren	64
5.1	Bewertung Balkenmessung	64
5.2	Genauigkeit der Messmittel.....	65
5.3	Einflussfaktoren auf die Messung mit der elektronischen Neigungswaage	67
5.3.1	Anzahl der Führungswagen	70
5.3.2	Länge der Prüfplatte	71
5.3.3	Anzahl der Messpunkte	74
5.3.4	Messung im unbelasteten Zustand.....	74
5.4	Überprüfung der Ergebnisse einer Neigungswaagenmessung mit einer Balkenmessung.....	75
5.4.1	Aufbau	76
5.4.2	Durchführung	77
5.4.3	Auswertung.....	78
5.4.4	Vergleichsmessung mit Messtaster und Messbalken	79
5.4.5	Vergleich der Messergebnisse Messtaster und Neigungswaage	81
6	Untersuchung der Formabweichungen	84
6.1	Temperaturdifferenzen	84
6.2	Führungsbahnabweichungen	85
6.3	Positionsabweichung der Führungswagen	85
6.4	Einfluss des Maschinenbettes.....	87
6.5	Setzkraftverlust.....	88
6.6	Untersuchung möglicher Formabweichungen der Linearführungen.....	89
6.7	Zusammenfassende Bewertung der Formfehler in Bezug auf die einzelnen Achsen	92
7	Untersuchung der thermische Einflüsse.....	94
7.1	Thermodynamische Faktoren	95
7.1.1	Wärmedehnung.....	95
7.1.2	Wärmeleitfähigkeit	97
7.1.3	Wärmefluss.....	97
7.1.4	Spezifische Wärmekapazität	98

7.1.5	Wärmeübertragung	99
7.2	Einfluss von Temperaturänderungen auf die Maschine	100
7.3	Erläuterung der Temperaturmessungen.....	105
7.4	Korrelation zwischen der Hallen- und der Maschinenbetttemperatur.....	108
7.5	Einflüsse auf die Hallentemperatur	109
7.5.1	Einfluss der Außentemperatur auf die Hallentemperatur	112
7.5.2	Jahreszeitlicher Zusammenhang der Temperaturschwankungen	116
7.6	Untersuchung verschiedener Bereiche der Montagehallen auf Temperaturdifferenzen	118
7.7	Versuch zur Temperaturstabilisierung mit Gebläsen	119
8	Ansätze zur Erhöhung der Prozesssicherheit	126
8.1	Klimatisierung der Montagehalle	126
8.2	Isolierung der Montagehalle.....	127
8.3	Teilklimatisierung eines Bereiches innerhalb der Montagehalle	128
8.4	Verlegung des Montageorts.....	129
8.5	Verlegung der Montageplätze	129
8.6	Wetterabhängige Produktionsplanung.....	130
8.7	Einsatz von Trennwänden	130
8.8	Einsatz von Gebläsen	130
8.9	Einführung eines qualitätssichernden Produktionsschritts.....	132
8.10	Neugestaltung des Maschinenbettes.....	133
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang.....	139
A1	Erläuterung der eingesetzten Software.....	139
A2	Glossar	142
A2.1	Alterung	142
A2.2	CCD (Charge Coupled Device)	142
A2.3	Computerschnittstelle	143
A2.4	Differentialkondensator	143
A2.5	Ebenheit	144
A2.6	Gestellbauformen	144
A2.7	Führungsbahnschleifmaschine	145
A2.8	Hauptsatz der Thermodynamik (1.)	145
A2.9	Innere Energie.....	145
A2.10	Kleben der Führungsschienen.....	145

A2.11 Körnungsangabe von Schleifpapier	146
A2.12 Künstliche Alterung	146
A2.13 LED (Light Emitting Diode).....	146
A2.14 Messbalken	146
A2.15 NPU-Reiniger	147
A2.16 O-Anordnung bei Kugelumlauf Führungen.....	147
A2.17 Planschleifen	148
A2.18 Relativbewegung.....	148
A2.19 Setzkraft	148
A2.20 Systematischer Fehler	148
A2.21 Temperaturdatenlogger	149
A2.22 Temperaturfühler Typ K.....	149
A2.23 Umkehrspanne einer Messung	149
A2.24 Wärme.....	150
A2.25 Wärmeabgabe eines Menschen.....	150
A3 Daten zur Analyse der Formabweichungen	151
A4 CD.....	160
A5 Abbildungsverzeichnis.....	161
A6 Tabellenverzeichnis.....	164

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Ausgleichspkt.	Ausgleichspunkt
CCD	Charge Coupled Device
Dr.	Doktor
f.	die folgende Seite
ff.	die folgenden Seiten
GG	Grauguss
Hrsg. (Hg.)	Herausgeber
Kap.	Kapitel
Montagehalle	Werkshalle 14 der BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH
o.J.	Schrift ohne Erscheinungsjahresangabe
o.O.	Schrift ohne Ortsangabe
Pos.	Position
Prof.	Professor
Prof. em.	Professor emeritus (im Ruhestand)
Prüfplatte	Messplatte, verschraubt mit dem Führungswagen
RS-232	Standard einer häufig verwendeten Computerschnittstelle ¹
S.	Seite
s.	siehe
Schiene	Linearführungsschiene der Firma INA
Tisch	Werkzeugmaschinentisch der Schleifmaschine
USB	Universal Serial Bus
Vgl.	Vergleiche

¹ Siehe im Glossar unter A2.3 Computerschnittstelle auf Seite 143.

Vorwort

Immer höhere Genauigkeitsanforderungen bei Werkzeugmaschinen machen eine systematische Betrachtung aller Einflüsse auf die Genauigkeit einer Maschine nötig. Die vorliegende Diplomarbeit ist das Ergebnis einer Untersuchung der Einflüsse auf die geometrische Genauigkeit von Schleifmaschinen. Bei der Vorgehensweise wurde als erstes eine detaillierte Ist-Aufnahme erstellt, in der alle Arbeitsschritte und Messinstrumente erfasst wurden. Es folgte eine Untersuchung der einzelnen Verfahren in Hinblick auf Störungen und deren Einfluss. Das isolierte Betrachten der einzelnen Faktoren auf die Endgenauigkeit der Schleifmaschine brachte letztendlich Ansätze zur Optimierung. Verfolgte man einen Ansatz des linearen Denkens, so würde man wahrscheinlich die Genauigkeit der Einzeltoleranten erhöhen, um die Gesamttoleranz der Maschine zu verbessern. Es zeigte sich relativ früh, dass diese Vorgehensweise wohl zu keinem befriedigendem Ergebnis führen würde.

1 Überblick

Die Firma BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH² fertigt seit über 50 Jahren Schleifmaschinen in Hamburg und ist ein Unternehmen der Körber Schleifring Gruppe. Die Produktpalette deckt diverse Plan- und Profilschleifmaschinen ab, die großteils kundenspezifisch entwickelt und gebaut werden. Verglichen mit anderen Maschinenbauunternehmen, sind die Losgrößen produzierter Maschinen bei BLOHM relativ gering. Sie fällt daher in den Bereich des Spezialmaschinenbaus.

1.1 Erläuterung des Schleifverfahren

Grundlegend werden zwei Arten von spanenden Werkzeugmaschinen unterschieden. Maschinen für Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, zum Beispiel Schleifen, Honen, Läppen und für Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, wie dem Drehen, Sägen, Fräsen, Hebeln. Gegenüber dem Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide stellt das Verfahren des Schleifens besondere Anforderungen an die Maschinen. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren wird beim Schleifen eine ausgezeichnete geometrische Genauigkeit und gutes statisches und thermisches Verhalten gefordert.³

1.2 Beschreibung der untersuchten Schleifmaschinen

Die in dieser Arbeit betrachteten Schleifmaschinen sind alle vom Typ PLANOMAT, einer von der BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH⁴ gebauten Planschleifmaschine⁵ in Kreuzbettbauweise.⁶ Die PLANOMAT-Schleifmaschinen werden in verschiedenen

² BLOHM JUNG Kurt-A.-Körber-Chaussee, 63-71, 21033 Hamburg.
Internet: www.blohmjung.com.

³ Dr. Andreas Hirsch, Werkzeugmaschinen: Grundlagen: Lehr- und Übungsbuch, Vieweg Verlag; Braunschweig/Wiesbaden, 2000, Seite 27.

⁴ Im Folgenden BLOHM genannt.

⁵ Siehe im Glossar unter A2.17 Planschleifen auf Seite 148.

⁶ Siehe im Glossar unter A2.6 Gestellbauformen auf Seite 144.

Ausführungen geliefert. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der Länge und Breite der Führungsbahn, die in einer Länge von 1070mm bis 2670 mm montiert wird.

Die PLANOMAT Schleifmaschinen haben je nach Konfiguration eine Spindelantriebsleistung von etwa 15 kW. Gängige Parameter sind hierbei eine Schnittgeschwindigkeit von 30 m/s und eine Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min. Als Kühlmittel kommt häufig eine synthetische Lösung auf Wasserbasis mit 200 l/min bei einem Druck von 6 bar, zum Einsatz.



Abbildung 1.1 PLANOMAT-Schleifmaschine (Foto)⁷

Durch die Verwendung von Kugelgewindetrieben mit Servomotoren, erreicht die PLANOMAT-Schleifmaschine hohe Vorschubgeschwindigkeiten und Beschleunigungen.

⁷ Bildquelle: BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH.

Tabelle 1.1 **Verschiedene Versionen der PLANOMAT in der Übersicht⁸**

PLANOMAT HP		408	412	608	612	616	620
Schleifbereich	mm	400 x 800	400 x 1.200	600 x 800	600 x 1.200	600 x 1.600	600 x 2.000
Tischauflspanfläche mit Zusatzflächen	mm	400 x 1.200	400 x 1.600	600 x 1.200	600 x 1.600	600 x 2.000	600 x 2.400
Abstand Tisch bis Spindelmitte	mm	150 ... 700 (Option 800)					
X-Achse, Tischlängsweg	mm	900	1.300	900	1.300	1.700	2.100
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	30...40.000				30...30.000	
Y-Achse, Schleifkopfsenkrechtweg	mm	550 (Option 800)					
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	4...6.000					
Z-Achse, Ständerquerweg	mm	360	360	560	560	560	560
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	4...6.000					
Schleifspindeltrieb, AC-Motor, regelbar	kW/ min ⁻¹	15/ 1.500					
Schleifscheiben	mm	400 x 30...80 x 127					
Abmessungen Breite	mm	3.410	4.410	3.410	4.410	5.450	5.450
Tiefe	mm	2.200	2.200	2.600	2.600	2.600	2.600
Höhe	mm	2.550	2.550	2.550	2.550	2.900	2.900
Gewicht, inkl. Schaltschrank	kg	4.100	4.400	4.900	5.400	7.000	8.000

Technische Änderungen vorbehalten

Die Tabelle 1.1 zeigt die verschiedenen Ausführungen der PLANOMAT Schleifmaschinen in der Übersicht. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre unterschiedlichen Schleifbereiche. Aus der Tabelle wird auch die Namensgebung der PLANOMAT Typenbezeichnungen klar. Eine Maschine vom Typ 408 hat einen Schleifbereich von 400 x 800, zusammengesetzt zu 408.

1.3 Problematik der Nacharbeit

Bei der Fertigung der Schleifmaschinen kann es vorkommen, dass diese die Endabnahmeprüfung nicht bestehen. Stellt sich heraus, dass eine Schleifmaschine bei der Endabnahme nicht die gewünschte geometrische Genauigkeit aufweist, muss sie wieder komplett demontiert werden. Die Nacharbeit der Führungen kann erst beginnen, wenn der gesamte Aufbau, einschließlich der Schienen, entfernt wurde. Problematisch ist hierbei, dass unter Umständen weder die Einhaltung des Liefertermins, noch eine vorausschauende Produktionsplanung möglich ist. Der zeitliche Verzug bei der Fertigung setzt sich

⁸ Quelle: BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH.

aus der Zeit für die Demontage, der Zeit für die Nacharbeit und der Zeit für die erneute Montage zusammen.

Ein weiteres Problem des Terminverzugs ist eine erschwerte Ressourcenplanung der Mitarbeiter und Arbeitsplätze. Für die Monteure kann es demotivierend sein, dieselbe Maschine erneut bearbeiten zu müssen. Ein Terminverzug kann zur Folge haben, dass die Kundenzufriedenheit sinkt. Durch eine erhöhte Auslastung an kritischen Punkten kann es auch zu Planungsschwierigkeiten bei anderen Maschinen kommen.

Die Abbildung 1.2 zeigt eine vereinfachte ereignisgesteuerte Prozesskette des Ablaufs der Nacharbeit. Je nach Mitarbeiterverfügbarkeit dauert der gesamte Prozess sehr lange, da alleine das wiederholte Ausrichten der X-Achsen-Führungsschienen mehrere Tage in Anspruch nimmt⁹. Dazu kommt der erneute Aufbau der Verkleidung und Installation der elektrischen Komponenten. Erst wenn die Maschine wieder komplett zusammengebaut ist, kann der Maschinentisch erneut eingeschliffen werden und die Abnahme erfolgen.

⁹ Vergleiche Kapitel 4.3 Montage der X-Achsen Linearführungen auf Seite 52.

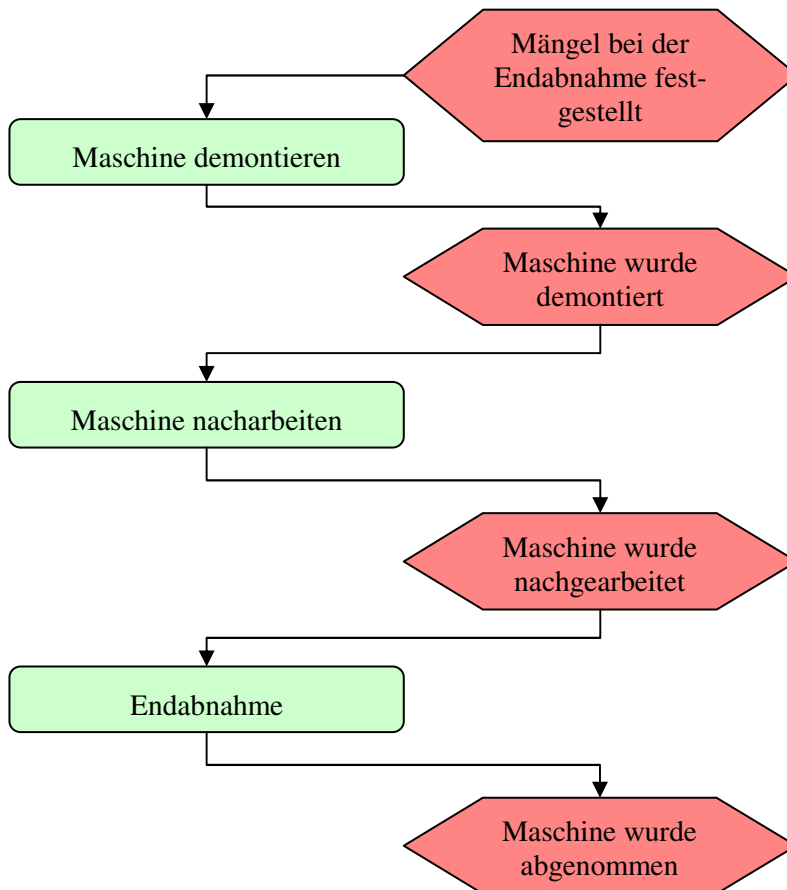


Abbildung 1.2 Ereignisgesteuerte Prozesskette der Nacharbeit

Nachfolgend werden nochmals die Punkte zusammengefasst, die eine mangelhafte Endabnahme nach sich ziehen kann.

- Probleme bei der Projektplanung
- Gefährdung des Zeitplanes
- Gefahr von Ressourcenproblemen durch zu hohe Auslastung
- Lieferprobleme bei anderen Maschinen durch Engpässe an kritischen Punkten
- Minderung der Kundenzufriedenheit
- Motivationseinbußen bei den Mitarbeitern
- Kosten durch Nacharbeit (Lohnkosten, Betriebskosten,...)
- Eventuelle Kosten für neues Material (Schienen, Kleinteile,...)

1.4 Vorgehensweise bei der Diplomarbeit

Bei der Montage der PLANOMAT stellt die Montage der X-Achse¹⁰ den wohl problematischsten Arbeitsschritt dar. Sie ist die längste Achse der Schleifmaschine und ist somit auch am anfälligsten für äußere Einflüsse, wie Verunreinigungen beim Zusammenbau und Temperaturschwankungen. Aus diesem Grund wird im Folgenden hauptsächlich auf diese Achse eingegangen.

Der erste Ansatz der Vorgehensweise war eine ausgiebige Ist-Analyse, wobei der Montageprozess unter den Gesichtspunkten der Aufgabenstellung untersucht wurde. Das Ziel dieser Analyse war es, sämtliche Einflüsse auf die Genauigkeit der späteren Schleifmaschine im Prozess zu ermitteln. Nach der Ist-Analyse wurde als nächstes jeder Arbeitsschritt genauestens zu hinterfragt. Alternative Möglichkeiten, im Vergleich zu den jetzigen, wurden auf ihre Tauglichkeit hin untersucht.

¹⁰ Vergleiche Abbildung 1.4 auf Seite 19.

2 Begriffsklärungen

2.1 Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ΔT	K	Temperaturunterschied; hier zwischen Unter- und Oberseite einer Platte
b	mm	Breite
c	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
C	JK^{-1}	Wärmekapazität
E_{th}	J	Thermische Energie
H	mm	Hebelarm (Länge)
h	mm	Höhe (allgemein)
H'_n	μm	Höhe des Ausgleichspunktes (Stelle n)
$H'_{s,\text{max}}$	μm	Höhe des Ausgleichspkt. (Stelle S_{max})
$H'_{s,\text{min}}$	μm	Höhe des Ausgleichspkt. (Stelle S_0)
H_n	μm	Höhe am Punkt n
l	mm	Länge, Auslenkung
l'	m	Verkürzte Länge
m	kg	Masse eines Körpers
M	Nm	Drehmoment
n	1	Anzahl
p	bar	Druck
Pa	Nm^{-2}	Pascal
Q	$\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$	Wärmemenge
R	$(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \text{W}^{-1}$	Wärmeübergangswiderstand

S	---	Schnittpunkt der idealen Krafteinleitungen
s	mm	Strecke
s_0	m	Strecke zum Punkt 0
s_{\max}	m	Strecke zum Maximalpunkt
s_n	m	Strecke von s_0 zum Punkt n
T	K, °C	Temperatur
t	mm	Abstand
W	Watt	Arbeit / Leistung
x	mm	Abweichung von der Ebenheit
α, φ	°	Winkel
α_T	K ⁻¹	Wärmeausdehnungskoeffizient
θ	K	Temperatur (Dimension)
θ_R	K	Umgebungstemperatur
λ	Wm ⁻¹ K ⁻¹	Wärmeleitfähigkeit
Φ	W	zugeführter Wärmestrom

2.2 Aufbau der Schleifmaschine

Die Abbildung 1.3 zeigt die PLANOMAT-Schleifmaschine in einer schematischen Zeichnung mit durchsichtigem Aufbau. Da sich diese Arbeit mit den Einflüssen auf die geometrische Genauigkeit der Schleifmaschine befasst, wird im Folgenden auf die Darstellung der äußeren Komponenten verzichtet. Die Abbildung 1.3 zeigt unter anderem die Maschinensteuerung, die Maschinenverkleidung und das Maschinenbett mit den Linearführungen. Gut zu erkennen sind hierbei die blau dargestellten Maschinenachsen und deren Position innerhalb der Maschine. In folgenden Abbildungen wird die hier verwendete Farbgebung beibehalten.

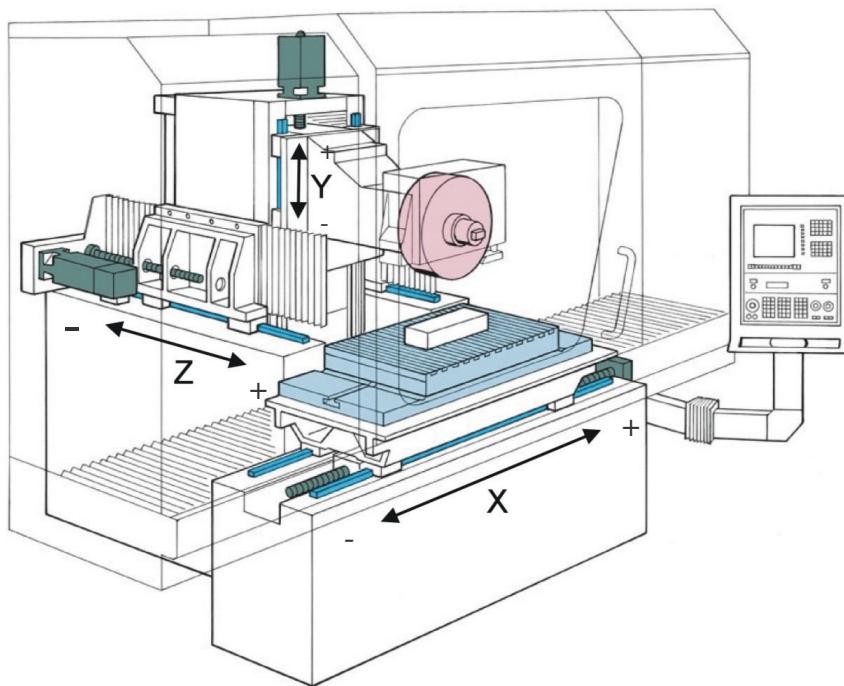


Abbildung 1.3 PLANOMAT-Schleifmaschine mit durchsichtigem Aufbau und Koordinatensystem¹¹

In Abbildung 1.4 ist der wesentliche Teil der Schleifmaschine zu sehen. Die X-Achse der Maschine trägt den Maschinentisch und verläuft von links nach rechts. Der Maschinenständer stellt die Y-Achse dar, die von unten nach oben verläuft. Die Z-Achse verläuft in Richtung der Spindel nach vorne und wird durch die Linearführung unter den Wangen geführt.

¹¹ Bildquelle: BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH.

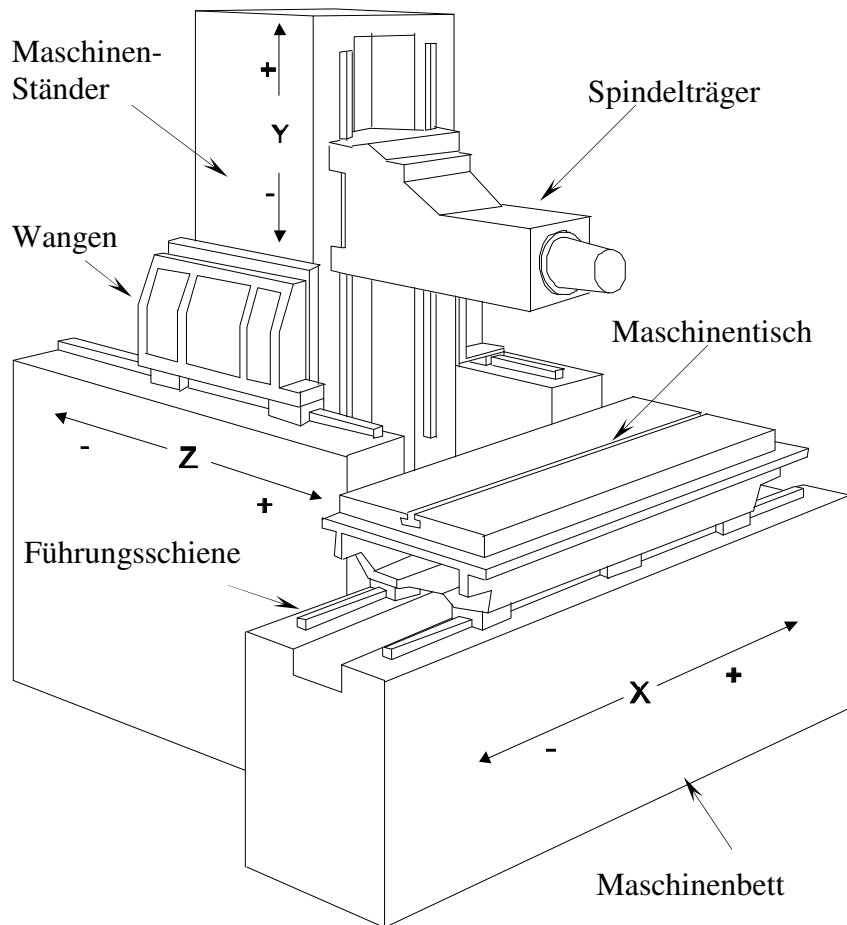


Abbildung 1.4: PLANOMAT Schleifmaschine Aufbau des Maschinenbettes mit Spindelträger, Linearführungen und Werkzeugmaschinentisch

PLANOMAT Schleifmaschinen sind (vgl. Abb. 1.4). in Fahrständerbauweise¹² gebaut. Hierbei wird der Maschinenständer in Z-Richtung bewegt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Abweichungen der Achsen und deren Richtung angegeben. Diese beziehen sich immer auf das hier gezeigte Koordinatensystem.

2.3 Maschinenbett

Das Maschinenbett ist eines der Elementarkomponenten einer Schleifmaschine. Im Fertigungsprozess werden die Schienen auf das Maschinebett montiert. Hierdurch nimmt es

¹² Prof. Dr. Grote, Karl-Heinrich; Prof. Dr. Feldhusen, Jörg: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 22. Auflage, 2007, Seite T22.

großen Einfluss auf die Genauigkeit der Linearführung und bestimmt somit die Präzision der Werkzeugmaschine.

Das Maschinenbett besteht aus Grauguss (GG25). Das Gussteil stammt aus China und wird nach der Anlieferung in Hamburg weiterbearbeitet. Dabei werden die Bereiche an den Führungsflächen grob vorbearbeitet um den nachfolgenden Schleifprozess zu erleichtern und zu beschleunigen. Mit Hilfe einer Waldrich- Führungsbahnschleifmaschine werden dann die so vorbearbeiteten Flächen geschliffen. Auf seiner Reise nach Hamburg wird der Guss auf Europaletten gelagert. Noch vor einiger Zeit wurde das Bett von den Monteuren mit Hilfe des Schabens der Führungsbahn angepasst. Heute wird die Führungsbahn dem Maschinenbett angepasst.

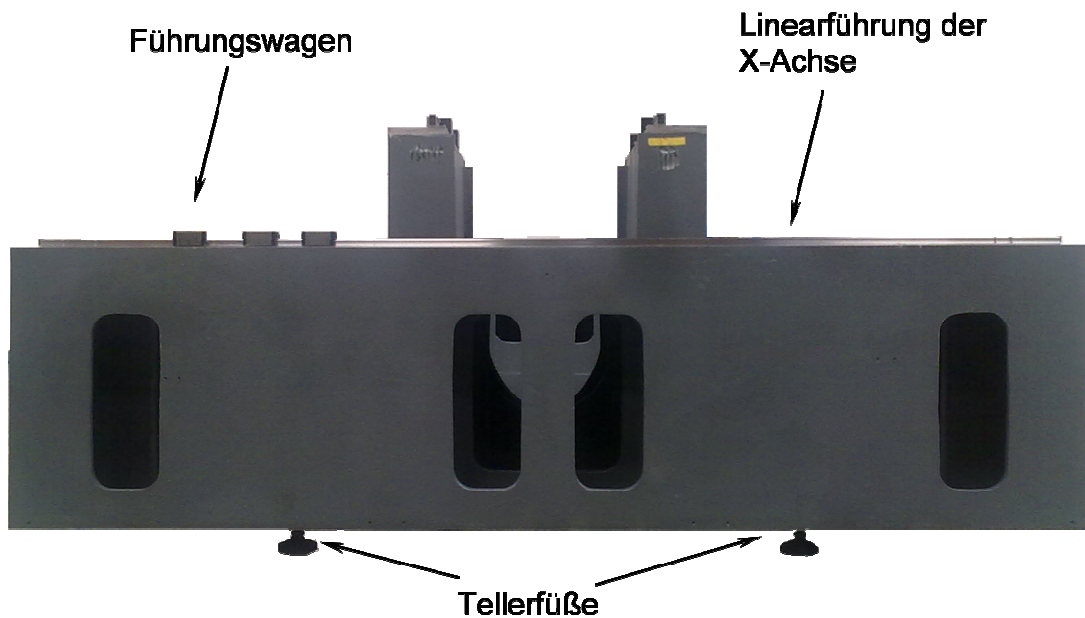


Abbildung 1.5 Maschinenbett mit fertig montierter Linearführung

Die Abbildung 1.5 zeigt ein Maschinenbett mit fertig montierten Linearführungen. Direkt nach dem Schleifen der Führungsbahnen wird das Maschinenbett auf seinen Tellerfüßen gelagert.

2.4 Linearführungen

„Linearführungen ermöglichen eine lineare Relativbewegung¹³ von Bauteilen.“¹⁴

Jeder starre Körper im Raum besitzt 6 Freiheitsgrade, 3 rotatorische und 3 translatorische. Die translatorischen verlaufen entlang der drei Raumkoordinaten. In unserem Fall sind es die X-, Y- und Z-Achse. Die rotatorischen Freiheitsgrade beschreiben die Möglichkeit einer Drehung um die Achsen. Eine Linearführung hat lediglich einen Freiheitsgrad, die anderen fünf sind durch Auflagepunkte festgelegt.¹⁵

Die in der PLANOMAT verwendeten Führungen sind Kugelumlaufführungen. Sie gehört zur Führungsart der Profilschienenwälzführung, welche die am häufigsten eingesetzte Form der Walzführungen ist¹⁶. In unserem Fall besteht der Walzkörper aus Kugeln. Die Formation der Kugeln ist sechsreihig mit O-Anordnung¹⁷.

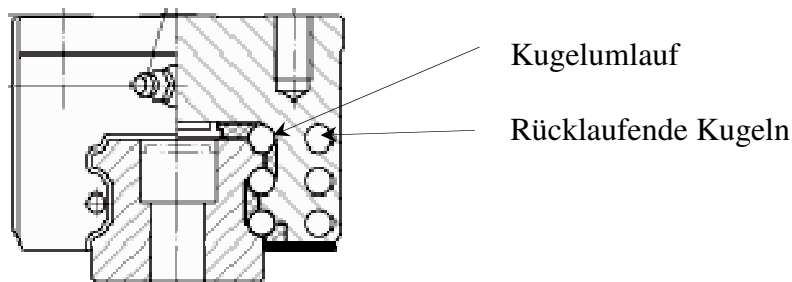


Abbildung 1.6 Aufbau der Profilschienenwälzführung¹⁸

¹³ Siehe im Glossar unter A2.16 O-Anordnung bei Kugelumlaufführungen auf Seite 147.

¹⁴ Prof. Dr. Künne, Bernd: Einführung in die Maschinenelemente; Teubner Verlag Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2001, Seite 14.

¹⁵ Prof. Ruß, August Georg: Linearlager und Linearführungssysteme: Einsatzmöglichkeiten - Berechnung – Auslegung, Expert Verlag Renningen, 2000, Seite 61.

¹⁶ Prof. Dr. Weck, Manfred; Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006, Seite 364.

¹⁷ Siehe im Glossar unter A2.16 O-Anordnung bei Kugelumlaufführungen auf Seite 147.

¹⁸ Quelle: INA (Marke), Herstellermarke der Schaeffler GmbH.

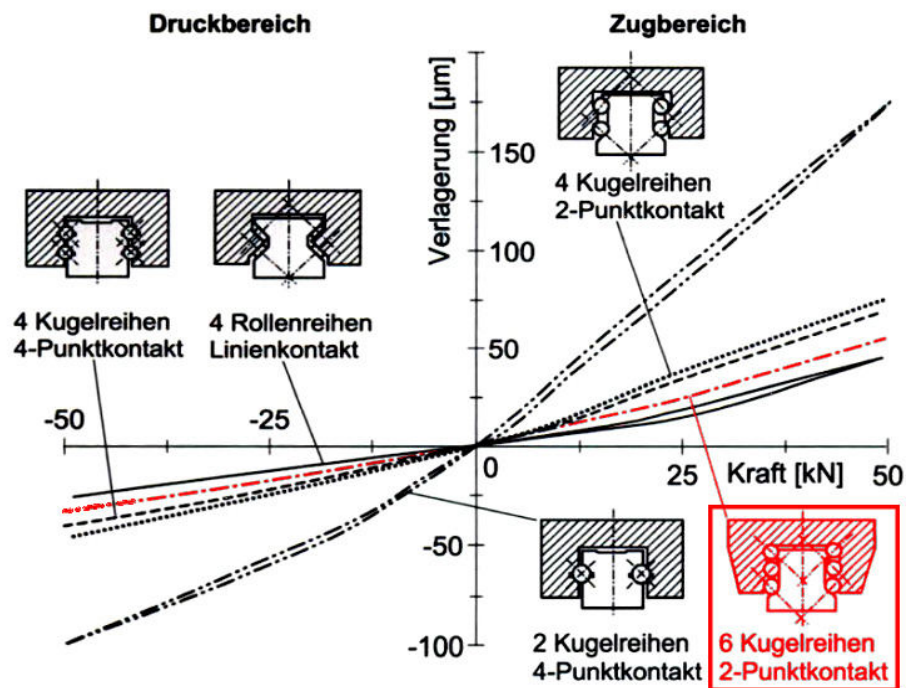


Abbildung 1.7 Vergleich der statischen Nachgiebigkeiten verschiedener Profilschienenwalzführungen unter Druck- und Zugbelastung¹⁹

Abbildung 1.7 zeigt die Eigenschaften verschiedener Profilschienenwalzführungen im Vergleich. Die von der Firma BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH verwendeten Führungen haben im Vergleich zu den zweireihigen Führungen eine unter Zug- und Druckbelastung geringere Nachgiebigkeit. Bei diesem Typ tragen unter Druckbelastung vier und bei Zugbelastung zwei Kugelreihen.

Der Schienensatz für die PLANOMAT-Schleifmaschine wird von der Firma INA geliefert. Die Führungsschiene ist aus gehärtetem Stahl und besitzt eine von INA angegebene Geradheitstoleranz²⁰ von 5 µm.

¹⁹ Bildquelle: Prof. Dr. Weck, Manfred, Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006, Seite 365.

²⁰ Vergleiche Kapitel 2.5.1 Geradheitstoleranz auf Seite 23.

2.5 Form- und Lagetoleranzen

An dieser Stelle wird näher auf die Form- und Lagetoleranzen eingegangen. Hierbei wird sich auf die für diese Arbeit relevanten Toleranzen beschränkt.

Toleranzen spielen bei der Fertigung der Schleifmaschinen eine wichtige Rolle. Sie bestimmen die spätere Genauigkeit und sollten daher genauestens hinterfragt werden. Wie in allen Bereichen der Konstruktion gilt natürlich auch hier der Grundsatz, jedes Maß so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich, zu tolerieren.²¹ Die Toleranzangaben werden in den nachfolgenden Kapiteln auf ihre Anwendbarkeit in der Fertigung überprüft und deren Einfluss auf das Endprodukt untersucht.

2.5.1 Geradheitstoleranz

Für die Geradheitstoleranz gilt folgender Zusammenhang: Eine Linie, die mit dem Geradheitstoleranzwert t toleriert ist, muss mit jedem Punkt innerhalb einer Toleranzzone liegen, die durch zwei parallele gerade Linien im Abstand von t zueinander stehen.

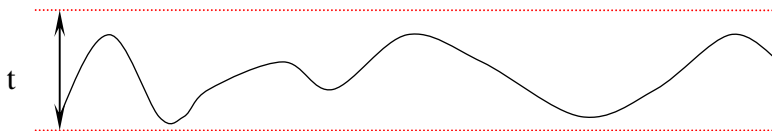


Abbildung 1.8 Geradheitstoleranz

2.5.2 Ebenheitstoleranz

Im Gegensatz zur Gerade besitzt die Ebene eine Dimension mehr.

„Die Ebenheitstoleranz ist der Abstand t zweier paralleler Ebenen²², zwischen denen alle Punkte der tolerierten ebenen Fläche liegen.“²³

²¹ Prof. Dr. Böge, Alfred: Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2007, Seite I2.

²² Siehe im Glossar unter A2.4 Differentialkondensator auf Seite 143.

²³ Prof. (em) Dr. Bantel, Martin: Messgeräte-praxis, Carl Hanser Verlag München Wien, 2004, Seite 158.

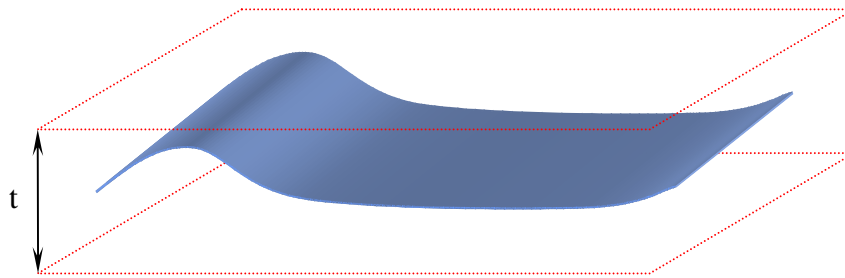


Abbildung 1.9 Ebenheitstoleranz

Die Ebenheitstoleranz ist bei der Endabnahme der fertigen Schleifmaschine von wesentlicher Bedeutung. Bevor die Maschine dem Kunden übergeben wird, durchläuft sie eine Ebenheitsuntersuchung des Maschinentisches.

3 Messverfahren

Die verwendeten Messmittel haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit des zu bearbeitenden Werkstücks. Das mit einem Messinstrument gefertigte Produkt kann maximal so genau sein, wie das Messmittel nach dem es gefertigt wurde. Hierbei zeigt sich, wie entscheidend es ist, das richtige Messmittel mit dem richtigen Messverfahren einzusetzen. Im Folgenden sollen die einzelnen Verfahren erläutert und messtechnisch bewertet werden.

3.1 Elektronische Neigungswaage

Das dominante Messmittel bei der Montage der Linearführungen ist die elektronische Neigungswaage. Bei BLOHM kommen Geräte der Schweizer Firma Wyler (Typ Blue-Level) zum Einsatz. Bei der elektronischen Neigungswaage handelt es sich um ein Winkelmessgerät, das den Erdmittelpunkt als Bezug zur Messung nimmt. Dieser Vorgang ähnelt einem Lot, an dem ein Winkel abgelesen wird. Umgangssprachlich wird die elektronische Neigungswaage auch Wasserwaage genannt, obwohl sich in ihr keine Flüssigkeit befindet.



Abbildung 3.1 Ansicht des Neigungsmessgerätes BlueLEVEL von Wyler²⁴

²⁴ Bildquelle: Firma Wyler, Schweiz.

Im Montageprozess der Führungsschienen kommt die Neigungswaage hauptsächlich bei der X-Achse zum Einsatz. Siehe dazu Abbildung 3.1.

3.1.1 Technische Funktionsweise der elektronischen Neigungswaage

Die Abbildung 3.2 zeigt ein Prinzipbild der Funktionsweise des Messgerätes.

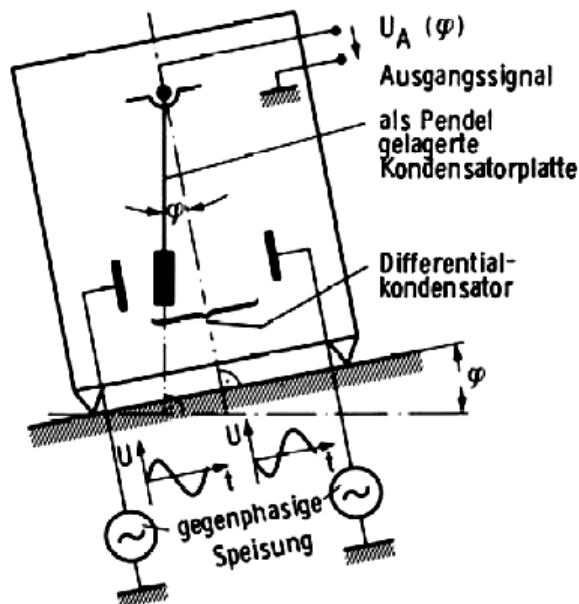


Abbildung 3.2 Prinzipbild eines Neigungsmessgerätes
(Quelle: Firma Wyler, Schweiz)

Durch gegenseitige Speisung des Differentialkondensators²⁵, dessen mittlere Platte an einem Pendel befestigt ist, wird das Ausgangssignal abgenommen. Die Ausgangsspannung ist dabei dem Winkel φ der ausgelenkten Platte proportional und wird auf einem Display in Winkelgrad angezeigt (vgl. Abb.3.1).²⁶

Beim Aufbau des Messgerätes wurde, bewusst auf ferromagnetische Komponenten verzichtet, damit das Gerät nicht durch magnetische Aufbauten beeinflussbar ist. Diese Eigenschaft wurde überprüft und es konnte keine Änderung des Messergebnisses durch Einwirkung eines Magnetfeldes festgestellt werden.

²⁵ Siehe im Glossar unter A2.4 Differentialkondensator auf Seite 143.

²⁶ Prof. Dr. Weck, Manfred; Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006, Seite 38 und www.wylerag.com [Besucht am 14.06.2011].

3.1.2 Messverfahren der elektronischen Neigungswaage

Bei diesem Verfahren wird die zu messende Strecke oder Ebene in äquidistante Schritte unterteilt. Gemessen wird jeweils der Winkel zwischen einzelnen Schritten. Hierbei wird das Messgerät auf einer Fläche oder, wie bei BLOHM mit einer Prüfplatte verschoben. Der Abstand ist jedes Mal von der Länge des Messgerätes oder der Prüfplatte abhängig. Die bekannte Breite der Messauflage ist somit die Länge der Schrittweite Δs . Die nachfolgende Abbildung soll den geometrischen Zusammenhang verdeutlichen. Hierbei ist s die Gesamtstrecke der zu vermessenden Gerade oder, je nach Messprogramm, die Länge der Ebene und Δs die Schrittweite. Die gemessenen Winkel sind die Einzelwinkel der Steckensegmente Δs und werden hier als φ_n bezeichnet.

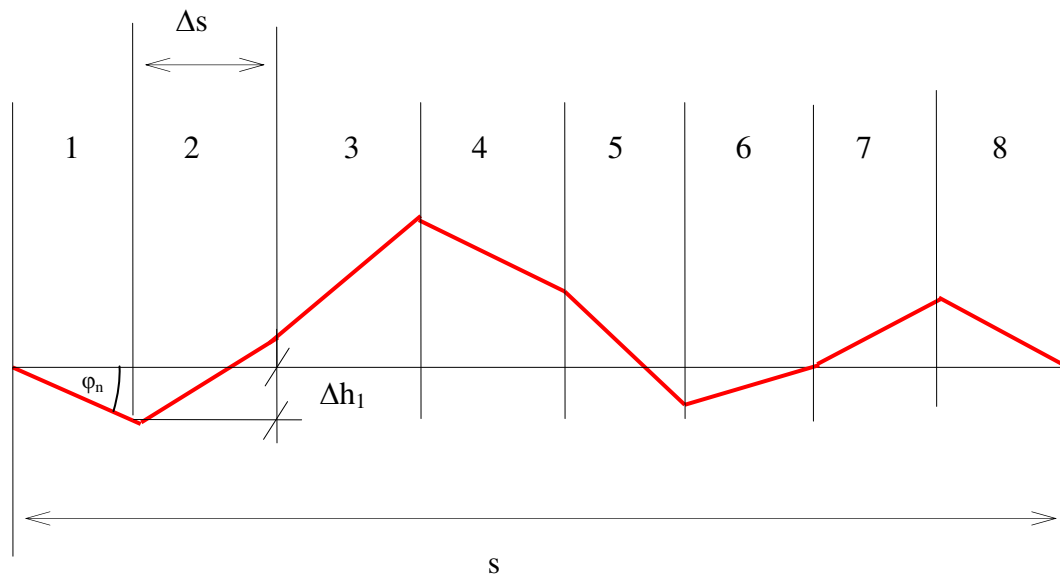


Abbildung 3.3 Verdeutlichung des geometrischen Zusammenhangs der Einzelmessungen

Die Basislänge Δs ist definiert, daher kann mit den einzelnen Winkeln φ_n die Höhe der Messpunkte Δh_n errechnet werden. Der Endpunkt der vorhergehenden Geraden ist der Anfangspunkt der Nachfolgenden.

Dabei gilt:

$$\Delta h = \tan(\varphi) \cdot \Delta s \quad (3.1)$$

Die Winkelmessungen sind, sehr genau. Gängige Neigungsmessgeräte haben eine Messunsicherheit von etwa $0,5 \mu\text{m}/\text{m}$. Betrachtet man allerdings das in der Abbildung

3.4 dargestellte Fehlereinflussmodell, zeigt sich, dass schon kleine Messfehler, deutlich unter einem Mikrometer, einen relativ großen Einfluss auf das Gesamtergebn haben können.

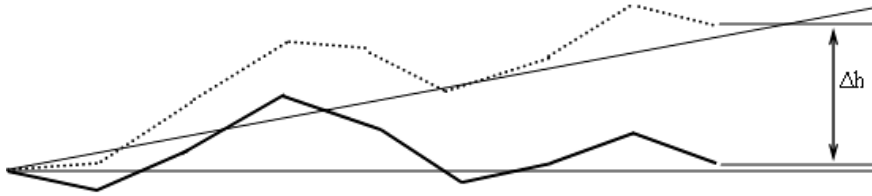


Abbildung 3.4 Problematik des systematischen Fehlers

In diesem Beispiel wird angenommen, dass lediglich der Winkel der ersten Messung unterschiedlich beziehungsweise fehlerhaft sei. Die darauffolgenden Messungen haben alle gleiche Einzelmesswerte, weisen aber einen Folgefehler auf, der sich durch die komplette Messreihe hindurchzieht.

Mathematischer Zusammenhang

Bei der verketteten Messung mit der elektronischen Neigungswaage gilt der allgemeine Zusammenhang:

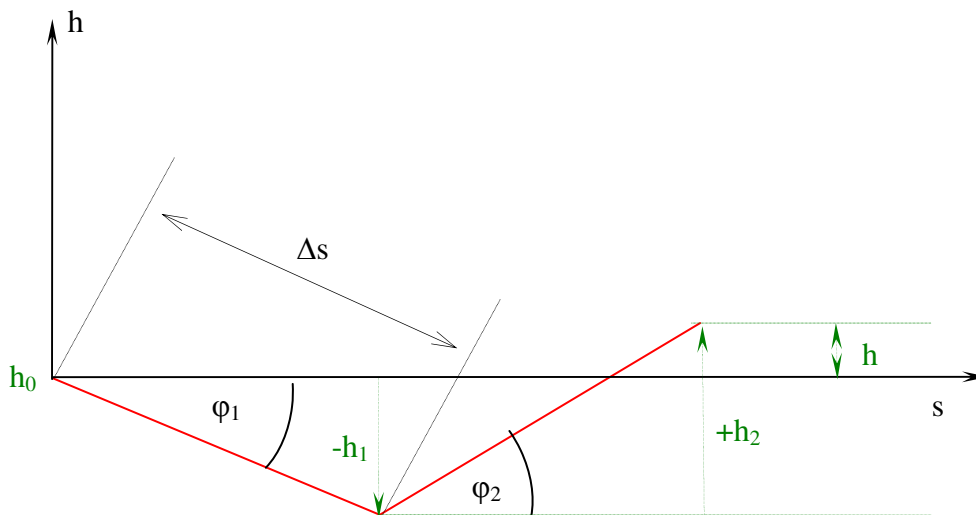


Abbildung 3.5 Modell zur Berechnung eines Profilbildes

$$h = h_0 + h_1 + \dots + h_n \quad (3.2)$$

Die Höhe des Endmesspunktes h ist die Ausgangshöhe h_0 vorzeichengerecht addiert mit den nachfolgenden Höhen h_1 bis h_n . Wie bei der Addition der Einzelhöhen zu einer Gesamthöhe, summieren sich auch die Fehler jeder Messung zu einem Gesamtfehler auf.

Bei der Messung handelt es sich um ein relatives Verfahren. Die Neigungswaage misst zwar absolute Werte in Bezug auf den Erdmittelpunkt, jedoch ohne absoluten Bezug. Der Vorteil der Relativmessung ist, dass die Ausrichtung²⁷ des zu vermessenden Objekts somit keine Rolle spielt; was zählt ist lediglich die Geometrie der Oberfläche. Das Messverfahren ist somit unabhängig von der Ausrichtung des Messobjekts (hier des Maschinentisches).

3.1.3 Vermessung von Linien mit Twist

Bei der Messung an der X-Achse mit der elektronischen Neigungswaage kommt das Messprogramm „Linien mit Twist“ zum Einsatz. Es wurde bereits erläutert, wie die Hauptlinie gemessen und erstellt wird. Bei der Linie mit Twist kommt nun noch der Winkel in Querrichtung hinzu.

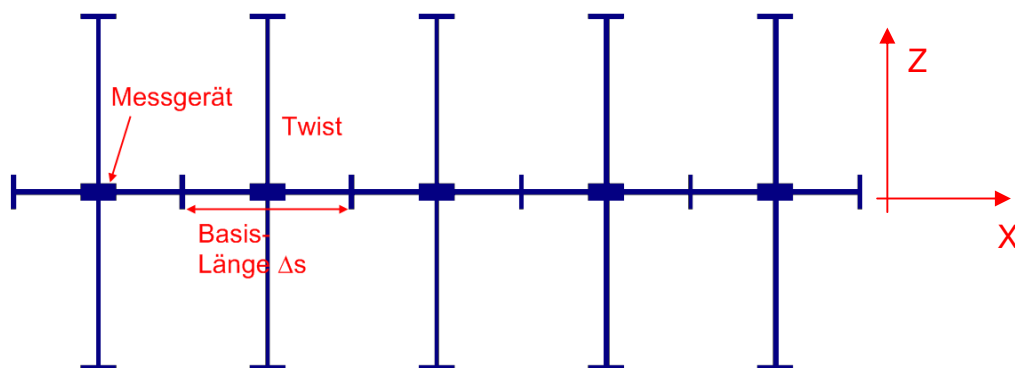


Abbildung 3.6 Modell der Twistmessung

Die Abbildung 3.6 verdeutlicht das Messprogramm. Bei den hier gezeigten fünf Messschritten werden im ersten Durchlauf alle Messungen, wie in der Abbildung 3.6 zu sehen, in X-Richtung aufgenommen. Als nächstes wird das Messgerät um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht, so dass es in Richtung der Z-Achse zeigt und nochmals alle fünf Messpunkte abgefahren. Die Messsoftware legt nun die aufgenommenen Querwinkel,

²⁷ Vergleiche Kapitel 3.1.4 auf Seite 31.

die sogenannten *Twists* auf die Geraden der Linienmessung. In der Abbildung 3.7 ist ein Ausdruck von der bei BLOHM verwendeten Software²⁸ zu sehen.

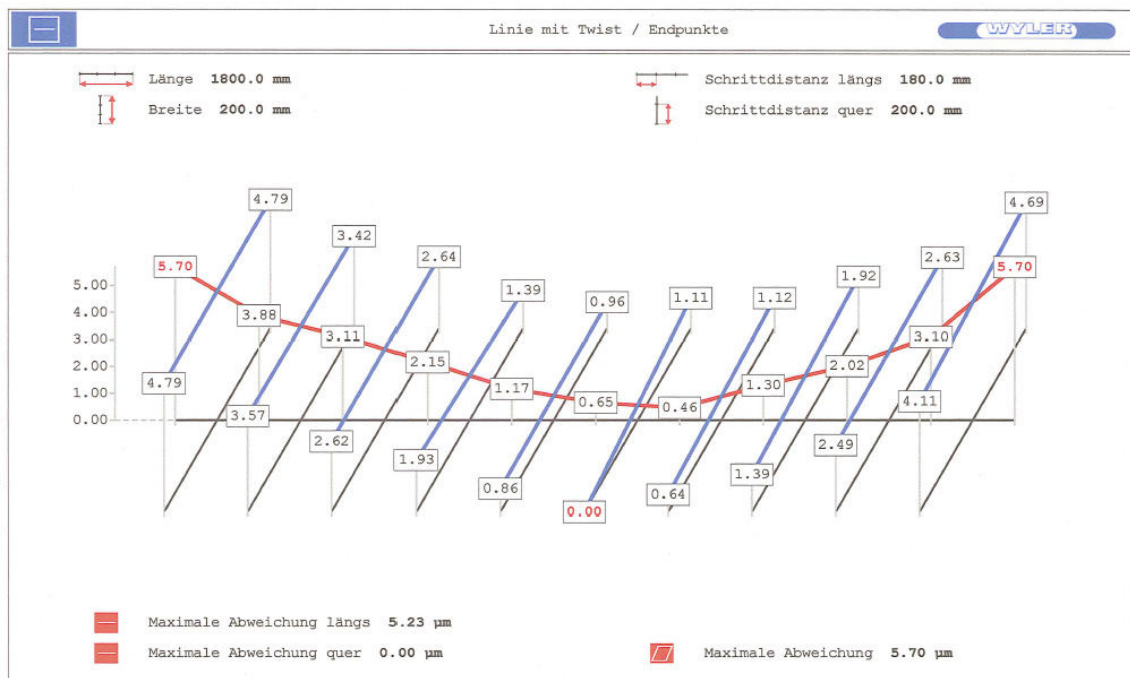


Abbildung 3.7 Ausdruck der Software LEVELSOFT PRO von Firma Wyler

Die rote Linie stellt den aufgenommenen Verlauf der Linearführung der X-Achse dar. Die hellblaue Linie gibt die Richtung des Twistes an. Drückt man vor dem Ausdrucken die „F5 -Taste“, erhält man zudem die Werte der einzelnen Punkte, ohne die eine Interpretation der Ergebnisse nahezu unmöglich ist.

Auch die Twistmessung hat keinen absoluten Bezugspunkt. Daher wird von der Auswertungssoftware die erste Twistgerade als waagrecht zur Orthogonalen des Erdmittelpunktes angenommen. Wie in der Abbildung 3.7 zu sehen, sind somit der vordere und hintere Wert gleich. Die Höhenposition ergibt sich aus der ersten Geraden des Längsprofils und ist der Mittelwert aus dem Anfangs- und Endpunkt der ersten Geraden in Längsrichtung (Richtung der X-Achse). Alle nachfolgenden Twistmessungen bauen in Querrichtung auf die erste Messung auf. Hierdurch werden die Winkel der Geraden immer die Differenz zur ersten Messung darstellen.

²⁸ Software LEVELSOFT PRO der Firma Wyler.

In der von BLOHM verwendeten Software ist die Achseneinteilung auf „automatisch“ eingestellt. Wie sich in Gesprächen herausstellte, kann dies bei ungeübten Mitarbeitern zu Interpretationsproblemen führen. Alternativ ist es möglich, in der Software, der Ordinate einen festen Wert zuzuweisen. Mit einer festen Achseneinteilung ist ein schneller quantitativer Vergleich der Diagramme untereinander möglich.

3.1.4 Verfahren zur Ausrichtung des Graphen

Die eingesetzte Messsoftware LEVELSOFT PRO verfügt über drei Möglichkeiten: Ausrichten nach Endpunkten, Ausrichten nach linearer Regression, und der Ausrichtung nach ISO 1101.

An dieser Stelle sollen die drei Verfahren näher erläutert und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit bewertet werden. Diese sind:

- Die Ausrichtung nach den Endpunkten (Kap. 3.1.4.1)
- Die Ausrichtung nach ISO 1101 (Kap. 3.1.4.2)
- Die Ausrichtung nach der Methode der linearen Regression (Kap. 3.1.4.3)

Leider lagen von Seiten der Firma Wyler nur sehr wenige Informationen über die internen Rechenoperationen der verwendeten Software vor. Nach Anfrage wurde lediglich auf deren Zertifizierungen hingewiesen. Die nachfolgenden Zusammenhänge entstanden daher durch Nachrechnung einzelner Modelle. Hierfür wurden mehrere Messdiagramme nach verschiedenen Ausrichtungsmethoden ausgegeben. Die Verläufe der Graphen und die maximalen Abweichungen wurden über die Messwerte nachgerechnet und mit denen der Software verglichen.

3.1.4.1 Ausrichtung nach Endpunkten

Bei BLOHM werden zurzeit die aufgenommenen Graphen an Hand der Endpunkte ausgerichtet.

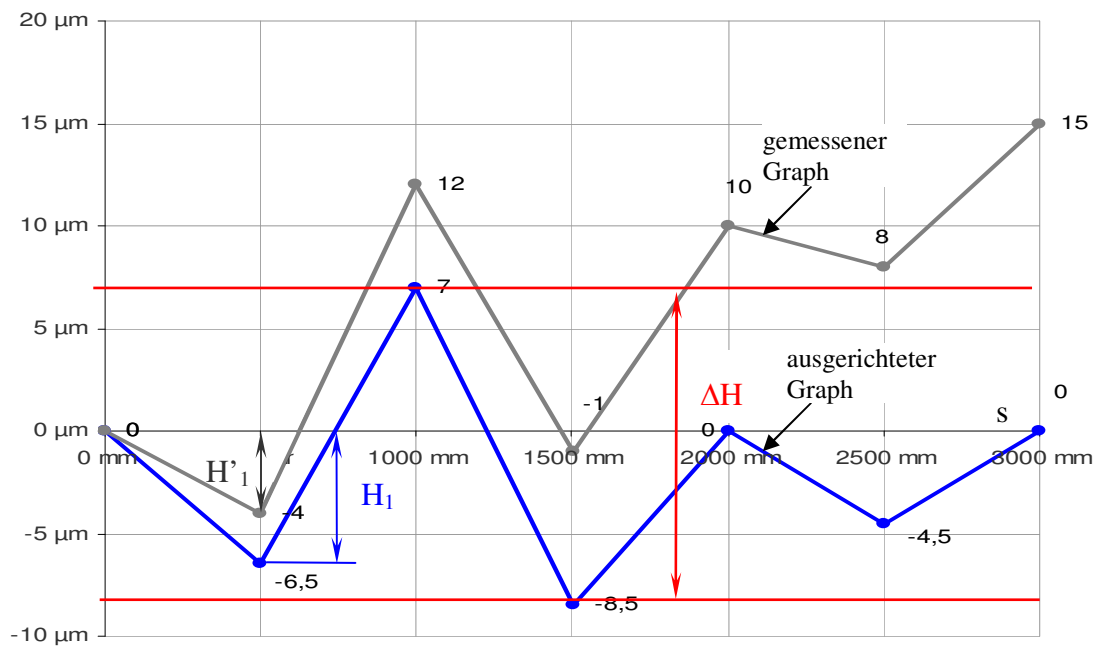


Abbildung 3.8 Ausrichtung nach Endpunkten

Die Abbildung 3.8 zeigt den Zusammenhang zwischen dem gemessenen, unausgerichteten Verlauf des Graphen und dem ausgerichteten Graphen (blau dargestellt).

ΔH ist der Abstand zwischen dem maximalen- und dem minimalen Wert der Abweichung. Für die Rechnung wurde der Strahlensatz²⁹ verwendet. H_n ist hierbei der Wert des Graphen an der Stelle s_n .

$$H'_n = H_n - \frac{H_{s_{\max}} - H_{s_{\min}}}{s_{\max}} \cdot s_n \quad (3.3)$$

Mit Hilfe der Gleichung (3.3) lässt sich für den Wert der Höhe H_n , mit Hilfe des Abstandes vom Ursprung s_n , auf den Wert der Höhe des ausgerichteten Graphen H'_n schließen. $H_{s_{\max}}$ und $H_{s_{\min}}$ sind hierbei die Werte von H an der Stelle s_0 und s_{\max} .

Um den in Abbildung 3.8 gezeigten, ausgerichteten Verlauf zu erhalten, wurde der zum Streckenverlauf proportionale Betrag einer gedachten Geraden abgezogen.

$$H'_n = H_n - \Delta y_n \quad (3.4)$$

²⁹ Vergleiche Abbildung 5.2 auf Seite 66.

Das nachfolgende Modell in Abbildung 3.9 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Grau dargestellt ist der unausgerichtete Graph. Die rote Linie stellt die durch den Strahlensatz³⁰ ermittelte Gerade dar. Zieht man nun jeweils das der Position entsprechende Δy_n ab, so erhält man den blauen, ausgerichteten Verlauf. Durch eine Addition mit dem Betrag des Anfangswertes kann der Graph optional noch nach oben verschoben werden.

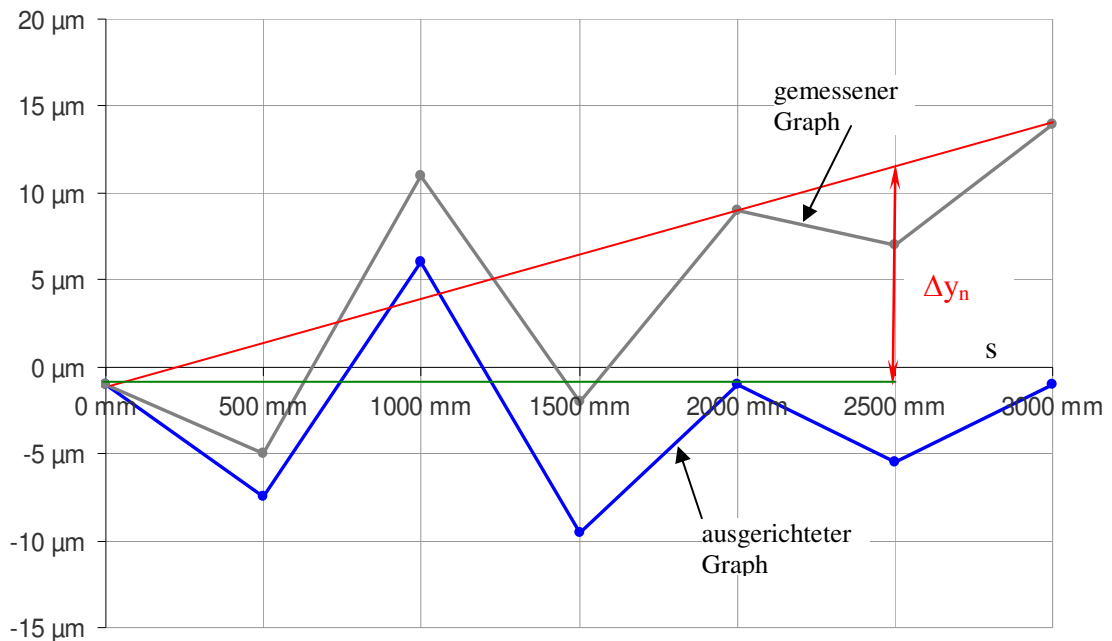


Abbildung 3.9 Ausrichtung nach Endpunkten – Verfahren

3.1.4.2 Ausrichtung nach ISO 1101

Die Ausrichtung nach ISO 1101 erfolgt über zwei parallele Geraden, die so lange verschoben werden, bis sie den kleinstmöglichen Abstand der Begrenzungslinien des Graphen eingenommen haben. Der senkrechte Abstand der Begrenzungslinien entspricht dem maximalen Fehler nach ISO 1101.

³⁰ Vergleiche Abbildung 5.2 auf Seite 66.

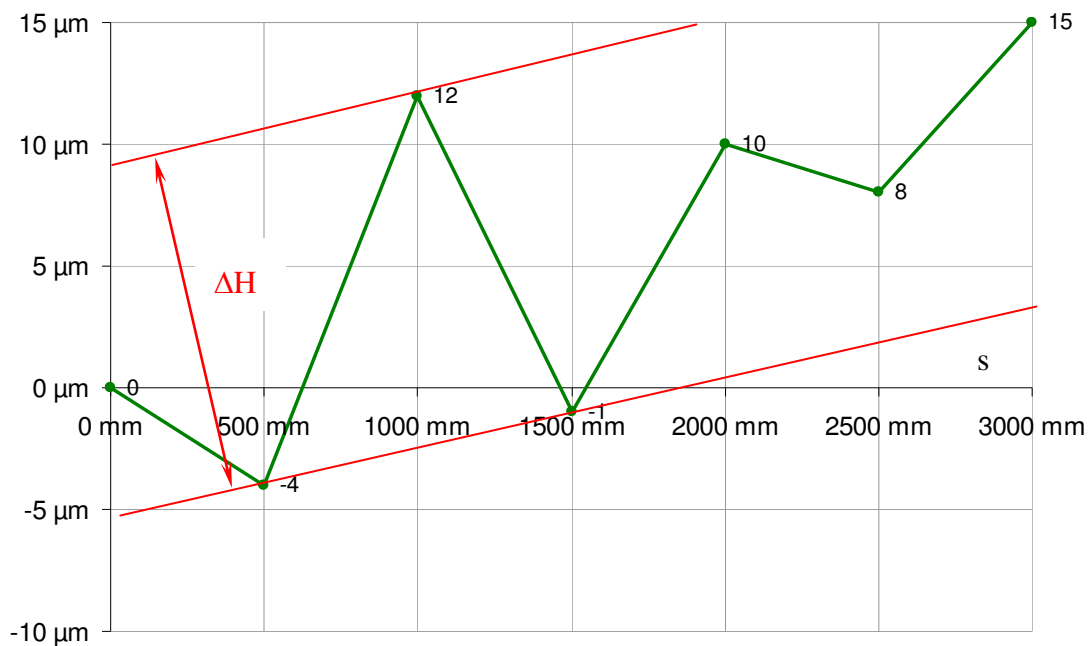


Abbildung 3.10 Ausrichtung nach ISO 1101

Die reine mathematische Ermittlung des Abstandes ΔH ist relativ komplex und für die Bewertung des Messverfahrens unbedeutend. Im Anhang A4 befindet sich ein Excel-Dokument, in dem das Verfahren angewendet wird.

3.1.4.3 Ausrichtung nach der Methode der linearen Regression

Eine weitere Möglichkeit der Software ist die „Ausrichtung nach der Methode der linearen Regression“. Bei dieser Methode geht die Software so vor, dass sie eine Regressionsgerade nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate erstellt. Die so ermittelte Gerade wird parallel verschoben, dass sie durch den höchsten und niedrigsten Punkt des aufgenommenen Graphen verläuft. Der senkrechte Abstand zwischen den beiden Geraden entspricht dem ermittelten Wert des maximalen Fehlers. Die Abbildung 3.11 veranschaulicht die Messung nach diesem Verfahren.

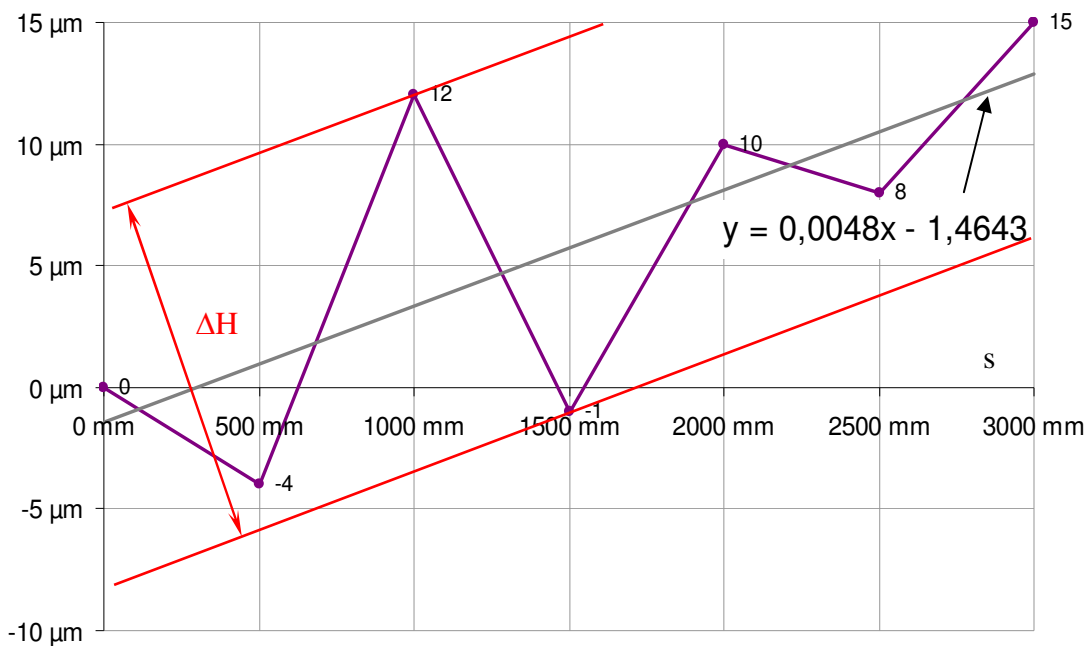


Abbildung 3.11 Methode der linearen Regression

Auch bei dieser Methode soll nicht näher auf den mathematischen Zusammenhang eingegangen werden.

3.1.4.4 Anwendbarkeit

Im direkten Vergleich, ergab sich bei den drei Verfahren nur ein geringer Unterschied. In Absprache mit den Monteuren zeigte sich, dass es manchmal einfacher ist nach dem Verfahren der ISO 1101 oder der linearen Regression zu arbeiten, da bei diesen Verfahren der Einfluss der Randzonen der Führungsbahn geringer sein kann. Treten thermische Verformungen der Randzonen auf, können diese durch den mathematischen Zusammenhang dazu führen, dass sich die Extrempunkte zu den anderen Modellen unterscheiden. Es hat sich gezeigt, dass ein Umschalten zwischen den angezeigten Methoden einen besseren Überblick über die nachzuarbeitenden Stellen bringen kann. Dies gilt besonders bei einer komplexen Geometrie. So fällt es gelegentlich leichter, die markanten Stellen für die Nacharbeit der Führungsschiene zu ermitteln. Um jedoch eine Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, sollte fürs Protokoll immer bei einem Verfahren geblieben werden.

3.1.5 Störfaktoren bei Messungen mit der elektronischen Neigungswaage

3.1.5.1 Fehlerbehaftete Erfassung des ersten Messwerts

Bei dem eingesetzten Messverfahren mit der elektronischen Neigungsmesswaage, wird der Start- und Endpunkt der Messung als Referenz angenommen. Alle Folgemessungen sind demnach direkt davon abhängig. Aus den Untersuchungen am Messverfahren zeigte sich, dass diese beiden Punkte möglichst genau gemessen werden sollten. In Wiederholungsmessungen kam es vor, dass unpräzise angefahrte Messstellen zu stark streuenden Messergebnissen führten. Ein Messfehler am Anfang wird sich ähnlich wie ein systematischer³¹ Messfehler auf alle aufbauenden Messfehler auswirken und deren Werte beeinflussen, da diese, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, additiv verknüpft sind.

3.1.5.2 Temperaturfluss zwischen Messgerät und Prüfaufbau

Die elektronische Neigungswaage ist ein sehr temperaturempfindliches Messgerät. Auf diesen Einfluss weist der Hersteller, sowohl in der Bedienungsanleitung, als auch in persönlichen Gesprächen hin. Das Messgerät sollte immer die gleiche Temperatur wie die Messauflage haben, weil der sonst entstehende Wärmestrom zu fehlerhaften Messungen führen kann.

Die Firma Wyler gibt in seiner Bedienungsanleitung folgenden thermischen Zusammenhang an:

$$x = \frac{\Delta T \cdot \alpha_{th} \cdot l^2}{8 \cdot b} \quad (3.5)$$

mit:

x Abweichung von der Ebenheit in mm

α_{th} Längenausdehnungskoeffizient in K^{-1}

ΔT Temperaturdifferenz zwischen Unter und Oberseite einer Platte in K

³¹ Siehe im Glossar unter A2.20 Systematischer Fehler auf Seite 148.

l Länge der Platte in Metern

b Plattendicke in Metern

Nach dieser Formel geht die Länge relativ stark in den Wert für die Abweichung ein. Für eine angenommene Dicke von 0,020 m, einer Länge von 1m, einem α_{th} von $10 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ und einer Temperaturdifferenz von einem 1K, ergibt sich eine Abweichung der Ebenheit von 62,5 μm . Dieser Wert dient lediglich der Verdeutlichung des Temperatureinflusses, da bei BLOHM Abweichungen $<4\mu\text{m}$ realisiert werden sollen.

Anders als vom Hersteller vorgesehen, wird bei Messungen an der Führungsschiene nicht das Messgerät bewegt, sondern der gesamte Aufbau mit der Platte³², von der anzunehmen ist, dass sie ihrer Temperatur während der Messung nur im ganz geringen Maße verändert.

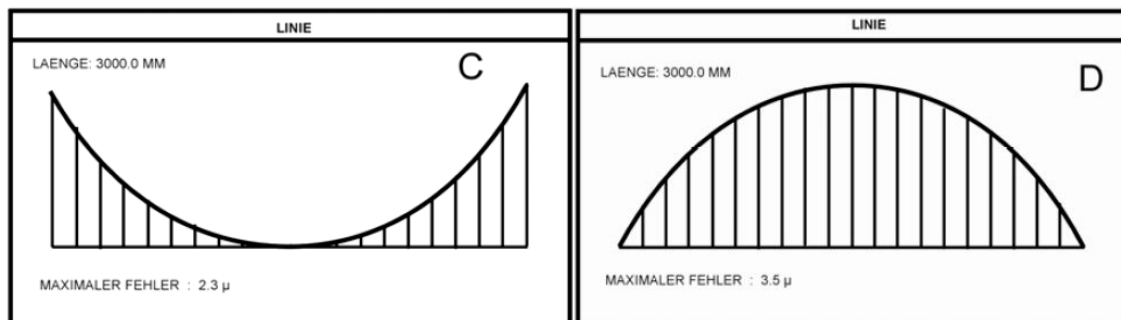


Abbildung 3.12 Messfehler durch Temperaturdrift³³

Liegt bei der Messung mit der elektronischen Neigungswaage ein Temperaturdrift vor, so kann sich laut Firma Wyler ein verfälschter Messkurvenverlauf, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, ergeben. Weicht ein Messergebnis bei der Vermessung der Führungsbahn deutlich von dem vorherigen ab, so ist auch dieser Zusammenhang zu prüfen. Mögliche Fehlerquellen können sich durch den Transport des Messgerätes in eine andere Halle ergeben oder auch durch eine Temperaturdifferenz zwischen Messgerät und Prüfplatte.

³² In den nachfolgenden Kapiteln wird ausführlicher auf den Versuchsaufbau eingegangen.

³³ Quelle: Firma Wyler.

Ausgehend von dieser Problematik empfiehlt es sich, das Messgerät nur am Holzteil anzufassen und jede Berührung, zum Beispiel durch längeres Ausrichten auf der Prüfplatte, zu vermeiden. Auch sollten die Messmittel immer genügend Zeit zur Temperaturangleichung haben.

3.1.5.3 Schwingungseinfluss

Um die Auswirkungen von Schwingungen auf das Messgerät zu bewerten, wurde im Versuch die elektronische Neigungsmesswaage an verschiedenen Punkten des Maschinenbettes aufgestellt. Über das Messprogramm ist diese in der Lage den Einfluss der Schwingung mit ihrem Pendel³⁴ aufzunehmen.³⁵ Das Messprogramm speichert für die Messung mehrere Werte hintereinander und gibt am Ende die Differenz zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert an. Die Schwindungsüberprüfung wurde an verschiedenen Punkten der Führungsbahn durchgeführt, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert in der Längsrichtung immer bei etwa $0,3 \mu\text{m/m}$ lag und von dem Messpunkt nahezu unabhängig war. In Querrichtung war die Abweichung deutlich geringer und lag bei etwa $0,1 \mu\text{m/m}$. Bei Durchführung der Messungen lief die Waldrich Führungsbahnschleifmaschine. In den Abbildungen 3.13 und 3.14 werden die Messergebnisse am Mittelpunkt der Führungsbahn und am Rand gezeigt. Der hier dargestellte Verlauf der Abszisse spiegelt, anders als bei normalen Messungen, die Zeit zwischen den einzelnen Messungen wieder. Die einzelnen Messpunkte geben den entstandenen Fehler durch den Schwindungseinfluss wieder. Die Schwingungsanregung erfolgt lediglich über die Übertragenen Vibrationen des Hallenbodens.

³⁴ Vergleiche Kapitel 3.1.1 Technische Funktionsweise der elektronischen Neigungswaage auf Seite 26.

³⁵ Bedienungsanleitung der Firma Wyler: Mess- und Auswertesystem mit Wyler Geometriemessprogramm LEVELSOFT PRO, Seite 14ff.

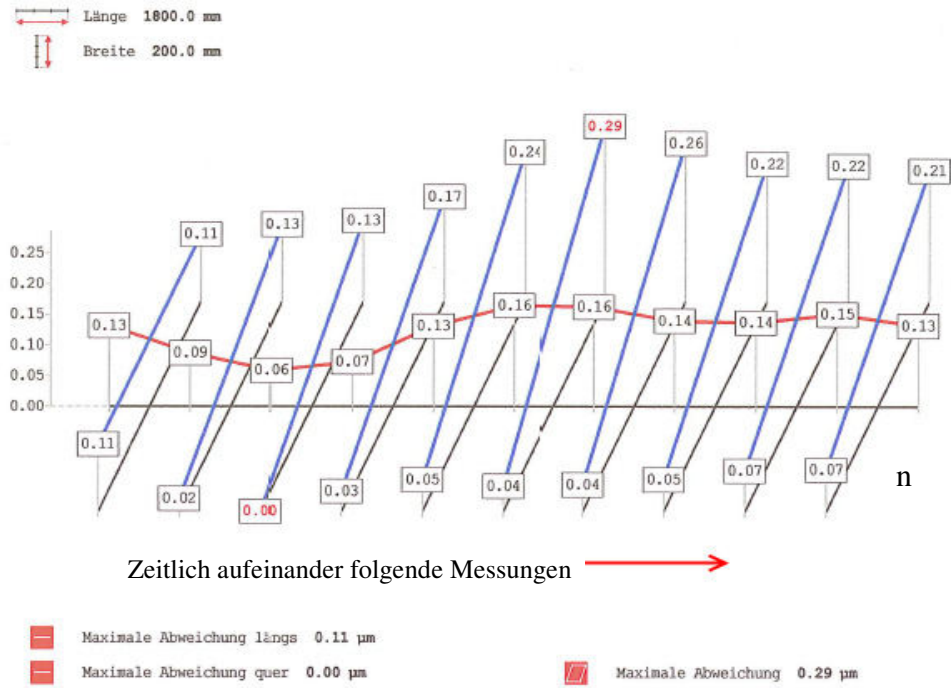


Abbildung 3.13 Schwingungen an der Führungsbahn, rechts außen

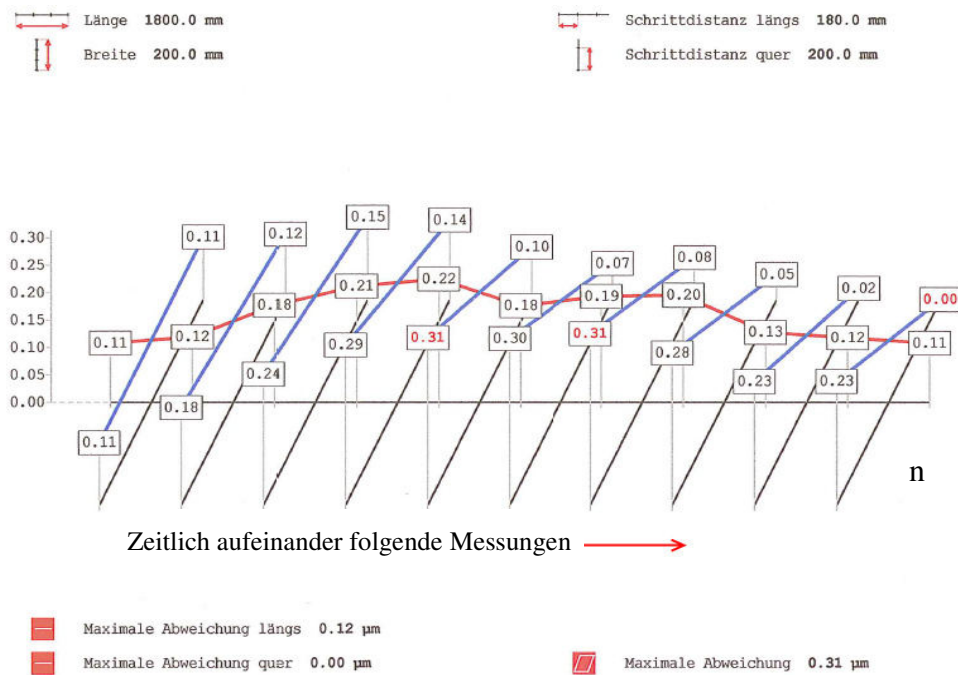


Abbildung 3.14 Schwingungen an der Führungsbahn, Mitte

Im Mittel ergab die Abweichung in Längsrichtung einen Wert von 0,14 µm/m Mit einer Standardabweichung von 0,04 µm/m.

3.2 Das Autokollimationsverfahren

Bei der Ausrichtung der Schienen der Y- und die der Z-Achse³⁶ kommt das das Autokollimationsverfahren zum Einsatz.

Die Funktionsweise des Autokollimationsfernrohrs beruht auf der Entsendung eines Lichtstrahls, der eine beleuchtete Marke ins Unendliche projiziert. Hierbei wird ein hochgenauer Planspiegel senkrecht so auf die zu prüfende Fläche gestellt, dass der Strahl in das Autokollimationsfernrohr reflektiert wird.³⁷ Der zurückgesandte Lichtstrahl trifft im Fernrohr nun auf eine Matrix, auf der die Koordinaten des austretenden Lichtstrahls mit denen des zurücklaufenden Lichtstahls verglichen werden. Im Idealfall liegen, der ausgesandte und der reflektierte Lichtstrahl im selben Punkt, also der Projektionsstrahl in sich selbst. In der Praxis wird der Lichtstrahl jedoch neben seine Startposition reflektiert. Die so messbare Abweichung ist ein Maß für die Neigung der Prüffläche und lässt auf den Neigungswinkel schließen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der gemessene Winkel den doppelten Wert des Winkels der zu messenden Stelle hat. Dies resultiert aus dem Winkel des Planspiegels und dem optischen Zusammenhang, dass der Betrag des Einfallswinkels gleich dem Betrag des Reflexionswinkels ist.

Das Messverfahren mit dem Autokollimationsfernrohr ähnelt stark dem der elektronischen Neigungswaage mit dem Unterschied, dass es sich hierbei um ein absolutes Messverfahren handelt, weil das eingesetzte Messmittel außerhalb des zu messenden Objekts steht.

Verkettet man die einzelnen Winkelmessungen mit den dazugehörigen Verfahrenswegen³⁸, kann auf die Geradheitsabweichungen sowohl in der horizontalen, als auch in der vertikalen Richtung geschlossen werden. Für die Y-Achse erhält man die Geradheitsabweichungen in X- und Z-Richtung und für die Z-Achse in X- und Y-Richtung. (Siehe analog Kap. 3.1.2).

³⁶ Vergleiche Abbildung 1.3.

³⁷ Prof. Dr. Pfeifer, Tilo, Prof. Dr. Schmitt, Robert: Fertigungsmesstechnik; Oldenburgverlag München, 2010, Seite 242.

³⁸ Vergleiche analog hierzu Kapitel 3.1.2 auf Seite 27.

Aufbau der Messapparatur

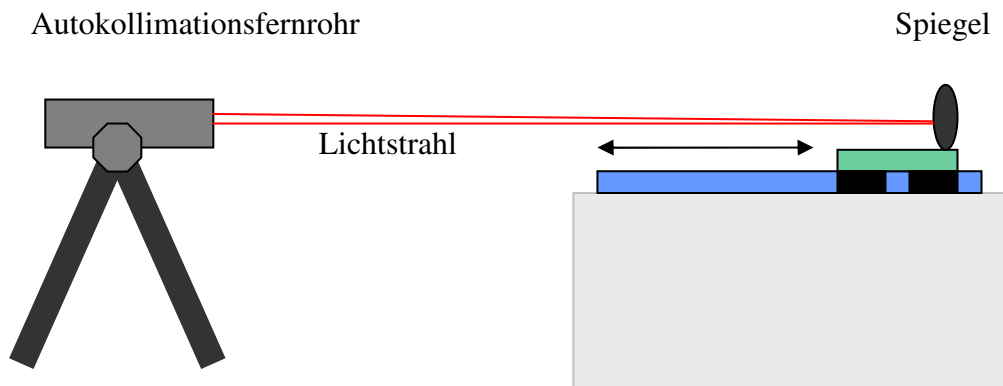


Abbildung 3.15 Aufbau des Autokollimationsverfahrens

Um die Geradheit der Y-Achsenführungen zu ermitteln, wird eine Platte mit dem Planspiegel auf die Führungswagen geschraubt und die Führungsschiene dann der Länge nach abgefahren. Die Schrittweite hängt auch bei dieser Messung von der Länge der Prüfplatte ab. Um das Autokollimationsfernrohr so auszurichten, dass der ausgesandte Lichtstrahl wieder zurück in das Fernrohr reflektiert wird, verfügt es über einen Aufsatz, der mit einem Laser ausgestattet ist und über das Rohr geschoben werden kann. Der auf der Platte montierte Planspiegel hat Einstellschrauben, mit denen der von dem Autokollimationsfernrohr ausgesandte Laserstrahl so eingestellt werden kann, dass dieser das Fernrohr genau im Mittelpunkt trifft. Nach dem Entfernen des Aufsatzes, misst die im Gerät vorhandene Matrix³⁹ das Auftreffen des Strahls in der jeweiligen Zeile und Spalte. Mit den gewonnenen Koordinaten ermittelt das Messsystem einen Winkel und darüber hinaus die Abweichung im Lauf der Führungswagen. Die Berechnung erfolgt in analoger Weise zur Messung mit der elektronischen Neigungsmesswaage.⁴⁰

Abweichungen der Führungsbahnen werden in horizontaler und vertikaler Richtung angegeben. Die Abbildung 3.16 veranschaulicht das Prinzip des ausgesandten Lichtstrahls und das Auftreffen des empfangenen Lichtstrahls (rot dargestellt). Die Strecken-

³⁹ Prof. Dr. Litfin, Gerd: Technische Optik in der Praxis; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005 Seite 203.

⁴⁰ Vergleiche Kapitel 3.1.2 auf Seite 27.

unterschiede, ΔX und ΔY der beiden Strahlen bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen innerhalb der Auswertungssoftware.

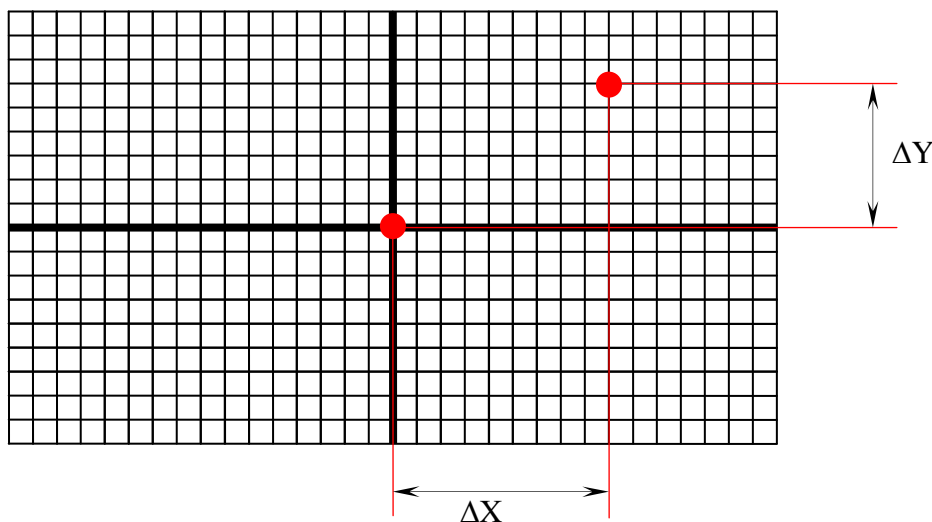


Abbildung 3.16 Funktionsweise der CCD-Matrix des Autokollimationsfernrohrs

Vereinfacht darstellen kann man die CCD⁴¹-Matrix mit Linien, deren Schnittpunkte die einzelnen Halbleitersensoren symbolisieren. Die Entfernungen der einzelnen Sensorpunkte innerhalb der Matrix sind hierbei bekannt, so dass das Eintreffen des Lichtstrahls sehr genau in die Stecken ΔX und ΔY umgerechnet werden kann. Erfolgt eine Belichtung der einzelnen Zellen, kommt es zu einem Ladungstransport innerhalb der CCD⁴². Eine nachfolgende elektronische Schaltung wertet den Spannungsunterschied aus und leitet die so erhaltenen Messwerte des Autokollimationsfernrohrs über eine Schnittstelle⁴³ an den PC weiter. Die Messunsicherheit des Autokollimationsfernrohrs liegt bei etwa $0,5 \mu\text{m/m}$.⁴⁴

⁴¹ siehe im Glossar unter A2.2 CCD (Charge Coupled Device) auf Seite 142.

⁴² Dr. Mahdavi, Nejat Tabatbaei: Zur inertialen Bahnvermessung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Robotern, Kassel University Press GmbH, 2009.

⁴³ Siehe im Glossar unter A2.3 Computerschnittstelle auf Seite 143.

⁴⁴ Prof. Dr. Keferstein, Claus P.: Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren; Vieweg+Teubner Verlag & Springer Fachmedien Wiesbaden, 2011, Seite 92.

3.3 Inkrementaler Messtaster

Der bei BLOHM eingesetzte inkrementale Messtaster ist eine besondere Bauform eines Messtasters. Er kommt bei der Vermessung der Z-Achse zum Einsatz⁴⁵ und dient der Längenmessung. Die Abbildung 3.17 zeigt den Aufbau eines Messtasters der Firma Heidenhain. Kommt es zu einer Auslenkung des Messeinsatzes, wird der Messbolzen, nach oben hin ausgelenkt. Die eigentliche Messung erfolgt mittels eines Glasmaßstabes mit einer Gitterteilung aus Stegen und Lücken, der sich Inkrementalspur nennt. Mit einer LED⁴⁶ als Lichtquelle wird das Ausgangssignal von einem photoelektrischen Element aufgenommen und elektronisch ausgewertet.⁴⁷

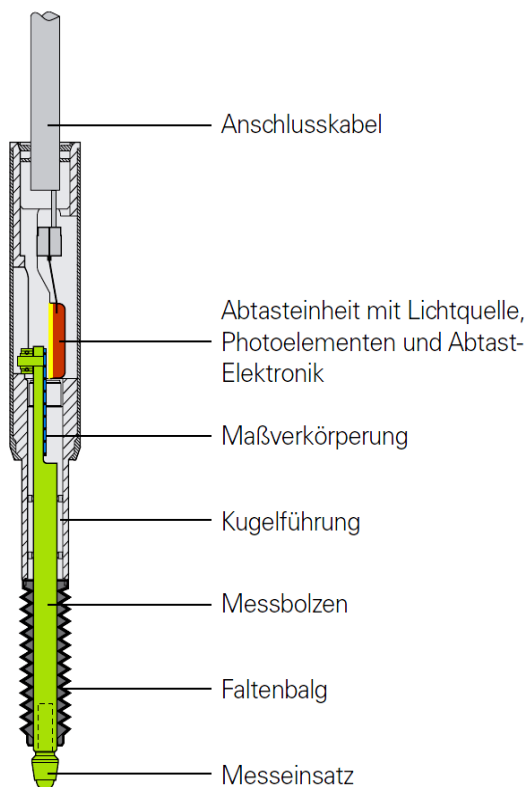


Abbildung 3.17 Aufbau eines Messtasters⁴⁸

⁴⁵ Vergleiche Kapitel 4.5 auf Seite 56.

⁴⁶ Siehe im Glossar unter A2.13 LED (Light Emitting Diode) auf Seite 145.

⁴⁷ Prof. (em.) Dr. Bantel, Martin: Messgeräte-praxis; Carl Hanser Verlag, München Wien 2004, Seite 97.

⁴⁸ Bildquelle: Dr. Johannes Heidenhain GmbH.

Der inkrementale Messtaster ist ein sehr präzises Messinstrument, Messgenauigkeiten von deutlich unter einem Mikrometer sind hier gängig. Die gemessene Genauigkeit hängt jedoch stark vom Messhilfsmittel ab. Dieses ist oft wesentlich ungenauer gearbeitet. Misst man auf einem Messbalken, so ist zu beachten, dass dieser meist Toleranzen von etwa 3-6 μm aufweist. Es kommen Oberflächenverschleiß und ein Verschmutzungseinfluss hinzu. Die Gesamtabweichung ist auch hier bestimmt durch die Summe der Einzelabweichungen.

3.4 Laserinterferometer

Ein für die Vermessung der Führungsbahn interessantes Messgerät ist das Laserinterferometer. Der Vorteil der Lasermessung ist, dass es sich hierbei um ein absolutes Messverfahren handelt. Das Ergebnis ist nicht von verketteten Einzelmessungen abhängig (vergleiche Kap. 3.1.5). Für einen Einsatz innerhalb des Montageprozesses sprechen eine sehr genaue Auflösung, die von Seiten der Hersteller, je nach Einsatzgebiet, mit deutlich unter einem Mikrometer angegeben werden.

Das Messsystem besteht aus einem Laser mit Detektor in einem Gerät, einem Wollaston-Prisma und einem Planspiegelreflektor. Der Laserstrahl wird im Wollaston-Prisma in einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Die beiden Strahlen durchlaufen verschiedene Strecken. Im Messsystem werden sie wieder überlagert. Durch die unterschiedlich langen zurückgelegten Wegstrecken, kommt im Detektor eine Phasendifferenz an. Über eine auswertbare Interferenz kann somit eine sehr genaue Strecke berechnet werden.

Bei der Geradheitsmessung wird das Verfahren etwas komplexer. Eine Lasermessung ist eine Entfernungsmessung und somit nur auf Umwegen für eine Geradheitsmessung anwendbar. Um dennoch eine Geradheitsmessung durchführen zu können, nutzt man den Winkelspiegel mit einem vorgeschalteten Wollaston-Prisma. Ein Wollaston-Prisma ist ein besonderer Strahlenteiler, der den Laserstrahl in einem genau definierten Diver-

genzwinkel aufspaltet.⁴⁹ Die Abbildung 3.18 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Messung einer Geradheitsabweichung an einer Linearführung.

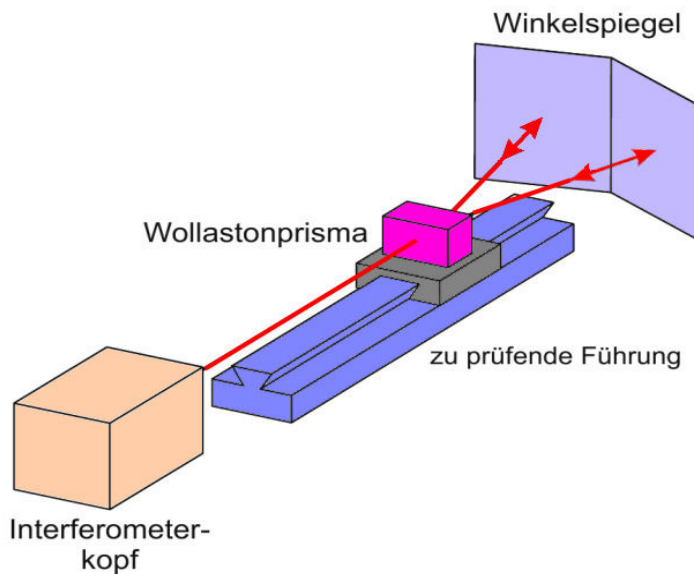


Abbildung 3.18 Aufbau zur Messung der Geradheitsabweichung einer Linearführung⁵⁰

Die sehr hohe Auflösung des Lasers bei der Streckenmessung und die Unabhängigkeit von der Länge der Prüfplatte, wie bei dem Autokollimationsfernrohr und der elektronischen Neigungswaage⁵¹, zeichnen dieses Messverfahren aus. Die Messung mit dem Laser zählt zu den absoluten Messverfahren, wodurch, je nach Messprogramm, Folgefehler wie bei Messungen mit der Neigungswaage ausbleiben. Eine Geradheitsmessung mit dem Laser bietet sich auf Grund der hohen Genauigkeit des Verfahrens an. Das Laserinterferometer hat jedoch auch einige Nachteile. Wie bei dem Autokollimationsfernrohr ist auch die Laserapparatur sehr schwingungsempfindlich.

⁴⁹ Prof. Dr. Pfeifer, Tilo: Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung. Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele; Expertverlag Ehningen 1993, Seite 40.

⁵⁰ Ursprung: Prof. Dr. Gevatter, Hans-Jürgen, Prof. Dr. Grünhaupt, Ulrich: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, Seite 283.

⁵¹ Vergleiche Kapitel 5.3.2 auf Seite 71.

3.4.1 Prüfung der Einsatztauglichkeit eines Laserinterferometersystems der Firma Renishaw

Die Firma BLOHM JUNG verfügt über mehrere Laserinterferometer der Firma Renishaw. Eine spezielle Geradheitsausrüstung ist ebenfalls vorhanden, kam jedoch bis jetzt noch nie zum Einsatz. In Versuchen mit dem Laser wurde dieses Verfahren auf seine Einsatztauglichkeit untersucht.

Die nachfolgende Abbildung 3.19 zeigt den verwendeten Geradheitsreflektor und ein Geradheitsinterferometer der Firma Renishaw. Bei dem Geradheitsinterferometer handelt es sich laut Renishaw um das Wollaston-Prisma⁵².

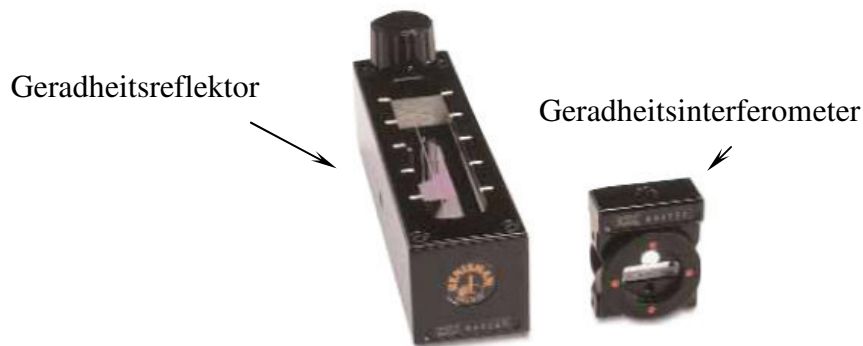


Abbildung 3.19 Geradheitsreflektor und Geradheitsinterferometer der Firma Renishaw⁵³

Abbildung 3.20 verdeutlicht den Aufbau der Geradheitsmessung mit einem Renishaw-Messsystem. Der eingezeichnete Laserstrahl wird im Interferometer geteilt, kommt als zwei Strahlen im Reflektor an und wird von hier wieder durch das Interferometer an das Gerät zurückgesandt. Bei diesem Aufbau wird die Führungsbahnabweichung vertikal gemessen. Um eine horizontale Abweichung aufzunehmen, müssen das Geradheitsinterferometer und der Geradheitsreflektor um 90° gedreht werden.

⁵² Laser-Handbuch Geradheitsmessung der Firma Renishaw, Version 2.1, 2007.

⁵³ Quelle: Renishaw GmbH.

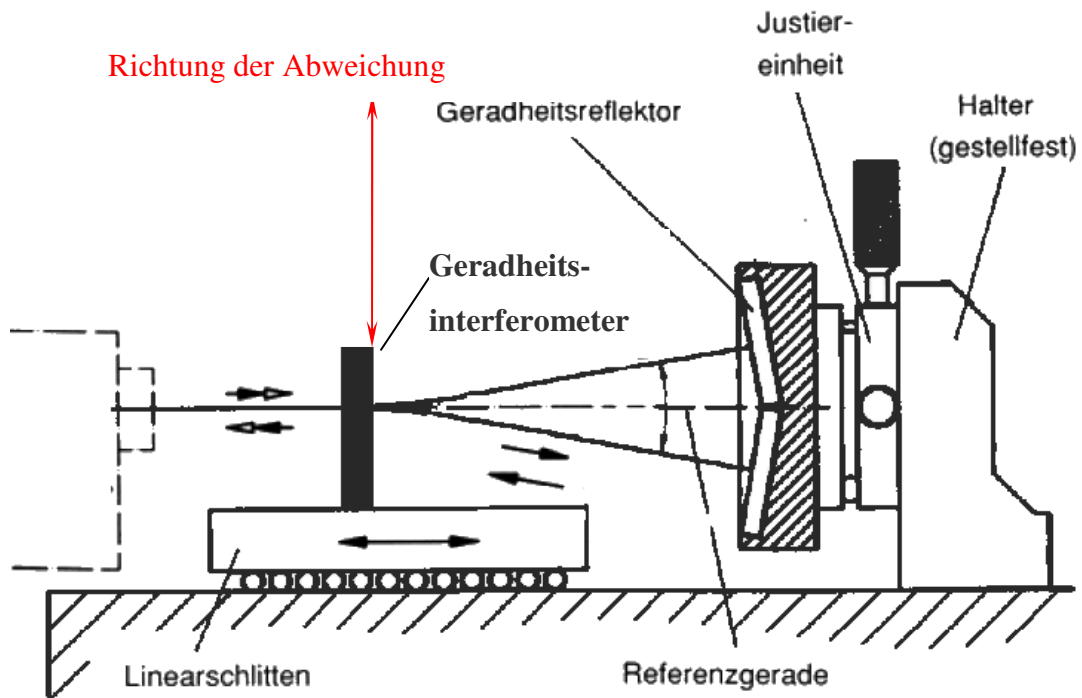


Abbildung 3.20 Prinzipieller Aufbau mit einem Renishaw-Messsystem⁵⁴

Die Ausrichtung des Laserstrahls erfolgt nach einem genau definierten Schema, welches der Anleitung des Herstellers zu entnehmen ist. Die nachfolgende Abbildung 3.21 veranschaulicht den Aufbau des ausgerichteten Laserinterferometersystems.

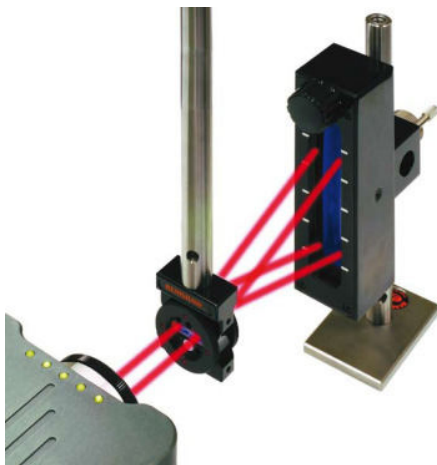


Abbildung 3.21 Geradheitsmesseinrichtung des Herstellers Renishaw⁵⁵

3.4.2 Allgemeine Genauigkeit des Messverfahrens

Nach der Tabelle 3.1 setzt sich die Genauigkeit wie folgt zusammen:

Bei BLOHM kommt ein Set für den kurzen Bereich zur Anwendung. Der Messbereich liegt bei ca. 2-10 μm bei einer Länge von etwa 2 Metern. Es ergibt sich also eine tolerierte Abweichung von etwa 1,6 μm .

Tabelle 3.1 Genauigkeit des Renishaw Laser Interferometer Systems⁵⁶

Technische Daten	Set für kurzen Bereich	Set für langen Bereich
Messbereich (axial)	0,1 - 4,0 m	1 - 30 m
Messbereich Geradheit	$\pm 2,5 \text{ mm}$	
Genauigkeit	$\pm 0,5\% \pm 0,15 \pm 0,15M^2 \mu\text{m}$	$\pm 2,5\% \pm 5 \pm 0,015M^2 \mu\text{m}$
Auflösung	0,01 μm	0,1 μm
Wobei M = Messstrecke in Meter; % = Prozentualer Wert der Anzeige		

Das Verfahren wäre damit wesentlich genauer als alle momentan eingesetzten Messverfahren. Entscheidend sind jedoch auch die zusätzlichen Einflüsse der mechanischen Komponenten. So kann durchaus ein zu großer Hebelarm einer Messeinrichtung oder Vibrationen, zu Verfälschungen des Messergebnisses führen.

3.4.3 Überprüfung der Genauigkeit des Messverfahrens

Das bei BLOHM JUNG vorhandene Laserinterferometersystem erwies sich in ersten Versuchen als relativ ungenau. Es zeigte sich eine große Streuung zwischen den Mes-

⁵⁴ Abbildung frei nach: Prof. Dr. Weck, Manfred, Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006, Seite 109.

⁵⁵ Bildquelle: Renishaw Broschüre: Systeme zur Überprüfung der Maschinengenauigkeit & Kalibrierung, 2011.

⁵⁶ Quelle: Renishaw Broschüre: Systeme zur Überprüfung der Maschinengenauigkeit & Kalibrierung, 2011, Seite 23.

sungen. Um mögliche Fehlerquellen und äußere Einflüsse ermitteln zu können, wurde in einem Versuch, ein Aufbau mit einem höhenverstellbaren Messkeil gewählt. Ändert man bei diesem Aufbau die Höhe des Geradheitsinterferometers, so kann diese mit dem Laserinterferometer und einer Messuhr parallel gemessen werden. Die Abbildung 3.22 zeigt den Versuchsaufbau. Beim Aufbau wurde darauf geachtet eine möglichst hohe Steifigkeit zu erreichen. Hebelarme wurden kurz gehalten und sämtliche Aufbauten miteinander verschraubt. Die folgende Abbildung 3.22 zeigt den Versuchsaufbau.

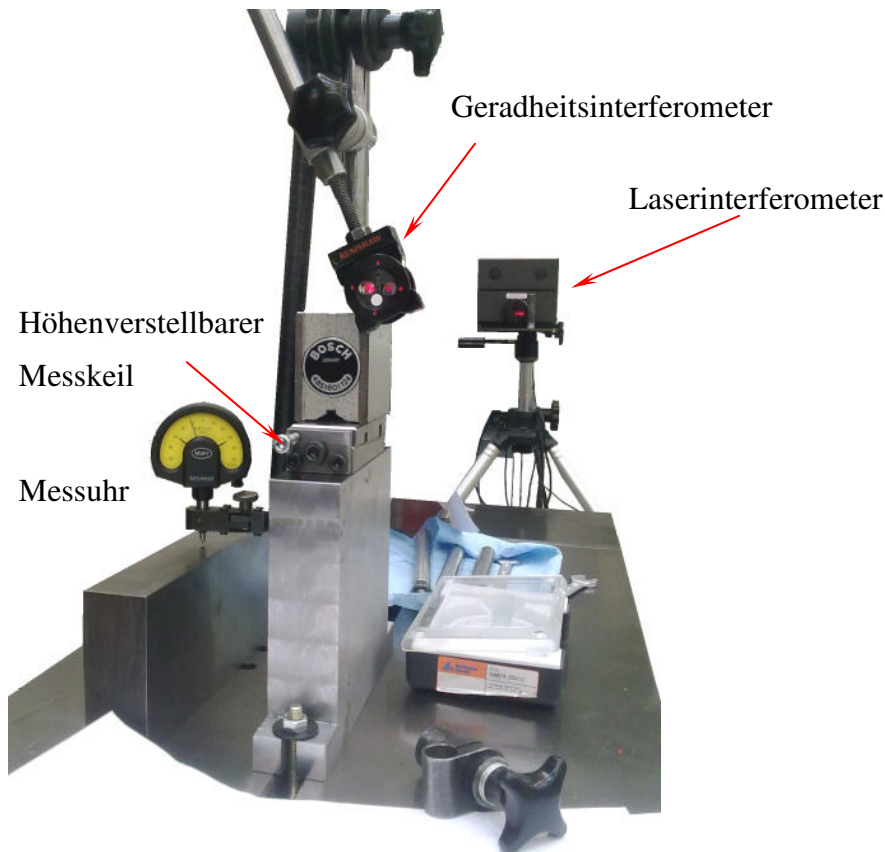


Abbildung 3.22 Versuchsaufbau zur Überprüfung der Messgenauigkeit des Laserinterferometersystems mit ortsfestem Maschinentisch

Bei der Auswertung des Messergebnisses zeigte sich, dass die Werte an der Messuhr mit denen des Laserinterferometers übereinstimmten. Die Geradheitsmesseinrichtung von BLOHM würde sich also für Messungen an Maschinenachsen eignen. Sobald allerdings ein Aufbau wie in der Abbildung 3.20 dargestellt gewählt wird, kommt es bei Bewegung zu einem nicht reproduzierbaren Ergebnis. Zum Zeitpunkt der Diplomarbeit stand ein klärendes Gespräch mit dem Hersteller noch aus. Eine mögliche Ursache des Problems könnte ein defektes oder nicht kompatibles Interferometer sein.

Der Geradheitsreflektor und das Interferometer werden zusammen ausgeliefert und dürfen unter keinen Umständen mit anderen vertauscht werden.

Sitzt das Interferometer nicht absolut ortsfest im Gehäuse, könnten Vibrationen beim Verschieben dazu führen, dass sich dies minimal bewegt. Messungen würden dann, selbst bei geringsten Positionsunterschieden zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Ein Mitarbeiter der Firma Renishaw geht in der ersten Annahme von einem vertauschten oder fehlerhaften Gerät aus. Eine Überprüfung der Einrichtung anhand der Seriennummern ist veranlasst, das Ergebnis steht jedoch noch aus.

4 Montageablauf

Die Montage der Führungen folgt einem bestimmten Ablauf. Die Z-Achse wird zuerst montiert, da die Führungsschiene über einen Anschlag verfügt, der ihre Position vorgibt. Eine Ausrichtung des Winkels entfällt somit. Der Vorteil ist, dass sich die Orthogonalität zwischen der X- und Z-Achse einfacher einstellen lässt.

Die Montage findet in der unklimatisierten Halle 14 statt, in der auch die Waldrich Führungsbahnschleifmaschine genutzt wird.

4.1 Ausrichtung des Maschinenbettes

Das Maschinenbett wird nach dem Schleifen der Führungsbahnen an der Waldrich Führungsbahnschleifmaschine, mit einem Hallenkran, an seinen Montagestandort gebracht. Es steht dann auf seinen drei höhenverstellbaren Tellerfüßen. Mit Hilfe einer Neigungswaage wird das Bett in X- und Z-Richtung, orthogonal zum Erdmittelpunkt ausgerichtet. Für den Montageprozess und die damit verbundenen Messungen ist eine genaue Ausrichtung nicht erforderlich und könnte prinzipiell entfallen.

4.2 Anpassung der Führungsschienen an das Maschinenbett

Prinzipiell ist es möglich, entweder das Maschinenbett an die Führungsschienen anzupassen oder die Führungsschienen an das Maschinenbett. Bei BLOHM findet die zweite Lösung Anwendung. Dies liegt unter anderem daran, dass es bei Problemen günstiger ist, eine neue Führungsschiene zu kaufen, als ein fehlerhaft angepasstes Maschinenbett nachzuarbeiten. Um die Schienen anzupassen wird handelsübliches Schmirgelpapier verwendet (Korn100–180⁵⁷). Vor längerer Zeit wurden die Führungsschienen durch das sogenannte Schaben angepasst. Man kam aber davon ab, da sich das Schmirgeln als einfacher erwies. Die grobe Korngröße ist verwunderlich, wenn man bedenkt, dass bei

⁵⁷ Siehe im Glossar unter A2.11 Körnungsangabe von Schleifpapier auf Seite 146.

der X-Achse auf 4-5 μm Ebenheitsabweichung genau gearbeitet werden soll. Dennoch zeigt die Erfahrung, dass diese Methode, zumindest im Messergebnis der Prüfung, gute Ergebnisse erzielt.⁵⁸ Wie sich die rauen Stellen jedoch unter Belastung verhalten und ob es zu einem späteren Setzkraftverlust⁵⁹ kommt, kann nicht so einfach vorhergesagt werden.

4.3 Montage der X-Achsen Linearführungen

Die X-Achse ist im Vergleich zu den anderen Achsen am schwierigsten zu montieren.

Direkt nach dem Auspacken des Kugelumlaufschienensatzes (Typ INA: KU-SE25H3V2) werden die Führungswagen entfernt und ihrer Position entsprechend gekennzeichnet. Da jeder einzelne Führungswagen an sich schon eine gewisse Abweichung hat, stellt das Markieren eine zusätzliche Sicherheit dar. Ein Vertauschen der Wagen kann eine andere Gesamtabweichung der vollständig montierten Achse zur Folge haben. Die Schienen werden vor der Montage mit einem Abziehstein (Ölstein) mehrmals abgefahren. X-Achsen Linearführungen werden immer paarweise ausgeliefert und auf das zuvor mit NPU-Reiniger⁶⁰ gesäuberte Maschinenbett aufgebracht. Nun werden die zu den Linearführungen gehörenden Schrauben (DIN 912-M6x25-12.9) locker mit den Führungsschienen verschraubt. Mit Hilfe einer Aufspannvorrichtung, die mit einem Hallenkran auf die Führungsschienen gesetzt wird, werden diese parallel ausgerichtet. Um die Rechtwinkligkeit der X- und Z-Achse voreinzustellen, wird mit einem auf der Montagevorrichtung befindlichen Tisch der Winkel mit einer Messuhr eingestellt. Die Ausrichtung geschieht, indem die Messuhr an zwei geschliffenen Flächen vorbeigeführt wird⁶¹. Die Vorrichtung wird solange ausgerichtet, bis das Messergebnis an beiden Messpunkten übereinstimmt.

⁵⁸ Vergleiche hierzu auch Kapitel 5.3.4 Messung im unbelasteten Zustand auf Seite 74 und Kapitel 6 auf Seite 84.

⁵⁹ Siehe im Glossar unter A2.19 Setzkraft auf Seite 148.

⁶⁰ Siehe im Glossar unter A2.15 NPU-Reiniger auf Seite 145.

⁶¹ Vergleiche Abbildung 4.1.

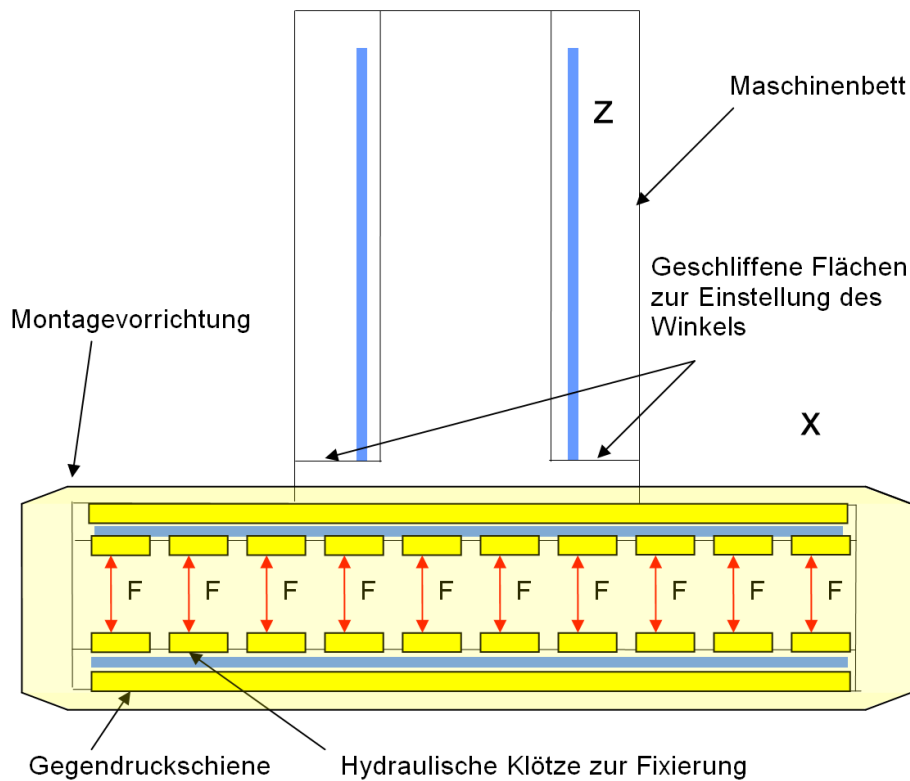


Abbildung 4.1 Aufbau und Funktionsweise der Montagevorrichtung

Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau und die Funktionsweise der Montagevorrichtung (gelb dargestellt). Die auf die blau dargestellten Führungsschienen gesetzte Vorrichtung übt mittels der hydraulischen Klötze eine Kraft F auf die Schienen aus. Die Schienen werden dadurch in Position gebracht und mit Schrauben von der Mitte nach außen, in mehreren Durchgängen, bis zum Erreichen des Enddrehmoments (16,5 Nm) angezogen. Durch diesen Verschraubungsprozess wird eine optimale Verspannung der Führungsschienen erreicht. Hierdurch entstehende Querkräfte werden minimiert. Die Montagevorrichtung bestimmt die Position der Führungsschienen und ist somit ein weiterer Einflussfaktor auf die Genauigkeit der Schleifmaschine. Durch die Vorrichtung werden die Parallelität und die Geradheit der Führungsschienen zueinander gewährleistet. Nachdem die Führungsschienen nun mit dem Maschinenbett verschraubt sind, kann die Montagevorrichtung wieder entfernt und die Ebenheit der Schienen bestimmt werden. In seltenen Fällen kann das Messergebnis von Anfang an innerhalb der geforderten Toleranz liegen. In diesem Fall können die Führungsschienen dann gleich geklebt⁶² werden. Sind

⁶² Siehe im Glossar unter A2.10 Kleben der Führungsschienen auf Seite 145.

allerdings einzelne Bereiche des Messergebnisses außerhalb der geforderten Toleranz, muss an diesen Stellen nachgearbeitet werden.

Um eine eventuelle Winkelabweichung in der Orthogonalität zwischen der X- zur Z-Achse zu vermeiden, muss eine zweite Prüfung durchgeführt werden. Zur Messung wird ein Messwinkel auf eine Prüfplatte gelegt (X-Achse) und mit einer Messuhr an dem Spindelträger über die Z-Achse abgefahren. Wird eine Differenz über der zulässigen Toleranz von $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ gemessen, werden die Schienen erneut mit der Montagevorrichtung eingestellt. Die Messung mit einem Messwinkel ist sehr viel genauer als die an der geschliffenen Fläche und ist daher zwingend erforderlich.

Toleranzmessung an der X-Achse

Die Messungen an der X-Achse erfolgen mit der elektronischen Neigungsmesswaage⁶³. Hierzu wird eine Prüfplatte auf vier Führungswagen geschraubt. Als nächstes wird die Markierung der Schritte vorgenommen, die sehr präzise am Maschinenbett angetragen werden sollten. Der Abstand der Markierung gibt so die Schrittweite an und ist abhängig von der Prüfplatte. Entscheidend ist der Abstand von der Mitte des einen Führungswagens zur Mitte des anderen Führungswagens. Die Abbildung 4.2 zeigt ein markiertes Maschinenbett mit einer Prüfplatte (Markierungen rot dargestellt).

⁶³ Vergleiche hierzu Kapitel 3.1 auf Seite 25.

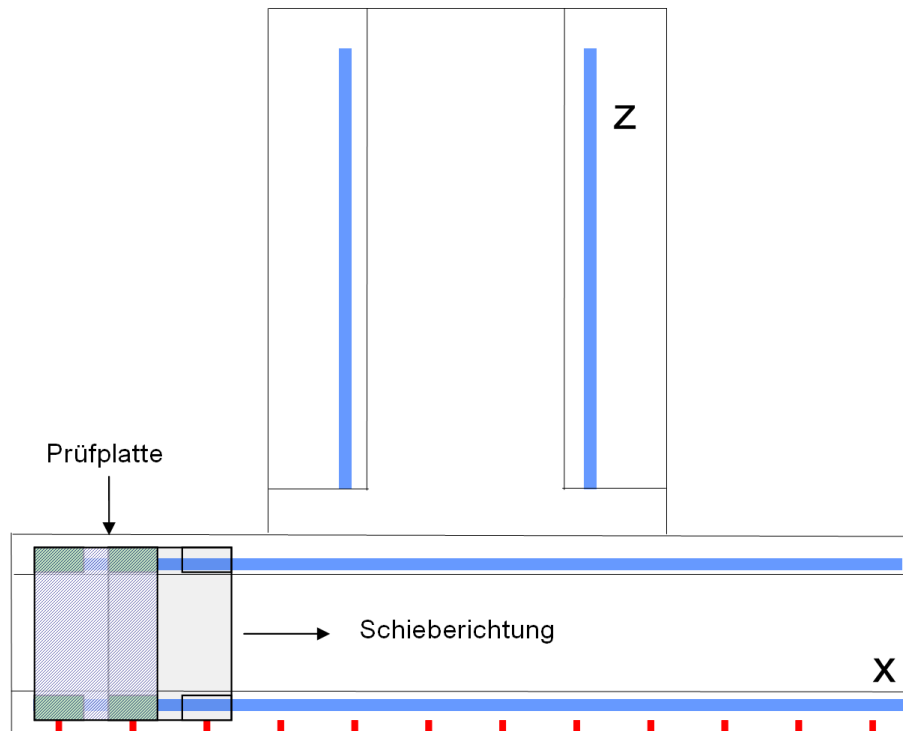


Abbildung 4.2 Maschinenbett mit Prüfplatte an der X-Achse

Um die Markierung etwas zu vereinfachen, kann von der Mitte des Maschinenbettes ausgegangen werden; hierfür wird ein Führungswagen mittig zum Mittelpunkt der X-Achse geschoben und die Mitten beider Führungswagen angetragen. Durch Verschieben der Prüfplatte erhält man nun jeweils die nächste Position. Der linke Führungswagen wird dabei so verschoben, dass er auf der vorherigen Position des rechten steht.

Für die Messung mit der elektronischen Neigungsmesswaage wird diese quer auf die Prüfplatte gestellt und an die erste Position gefahren. Für jeden Messschritt wird dann mit dem Computer der jeweilige Wert des Winkels aufgenommen. Nach dem letzten Schritt beginnt dann die Messung in Querrichtung. Hier wird das Messgerät um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn gedreht. In dieser Position werden alle Messpunkte erneut abgefahren. Aus den erhaltenen Werten am erstellt er Computer dann am Ende ein Messdiagramm (vgl. Abbildung 3.7), dass als Grundlage zur Anpassung der Führungsschienen dient.

4.4 Montage der Y-Achsen Linearführungen

Die Führungsschienen der Y-Achse erwiesen sich im Montageprozess als unproblematisch. Darum soll an dieser Stelle nur im Wesentlichen darauf eingegangen werden. Für die Montage kommt eine von der X-Achse bekannte Vorrichtung zum Einsatz. Als Bezugspunkt für die Ausrichtung dienen hierbei zwei geschliffene Bezugsflächen. Zur Überprüfung der Toleranz wird eine Messung mit dem Autokollimationsfernrohr⁶⁴ vorgenommen. Kommt es zu größeren Abweichungen, wird erneut aufgespannt oder die Säule an der Waldrich-Führungsbahnschleifmaschine nachgearbeitet.

4.5 Montage der Z-Achsen Linearführungen

Der Rollenumlaufschienensatz (Typ INA: RUE 35) wird, wie bei den anderen beiden Achsen entsprechend vorbereitet. Die Führungswagen werden mit ihrer Position auf der Schiene markiert und mit einem Abziehstein abgezogen. Nun werden die Schienen auf das zuvor geschliffene und gesäuberte Maschinenbett gelegt und lose mit sehr leicht angezogenen Schrauben versehen. Die Montage erfolgt erst probeweise. Eine Fixiervorrichtung drückt hierbei die Führungsschiene gegen eine als Anschlag dienende Kante am Maschinenbett. In der Abbildung 4.3 wird dieser Vorgang veranschaulicht. Eine auf das Maschinenbett geschraubte Fixiervorrichtung (schwarz dargestellt) sitzt direkt neben der INA- Linearführung. Schrauben, die von der Seite gegen die Führungsschiene drücken, fixieren diese, indem sie diese gegen die Kante am Maschinenbett drücken. Die zuvor nur leicht eingeschraubten Schrauben der Führung können nun mit dem entsprechenden Drehmoment angezogen werden.

⁶⁴ Vergleiche Kapitel 3.2 auf Seite 40.

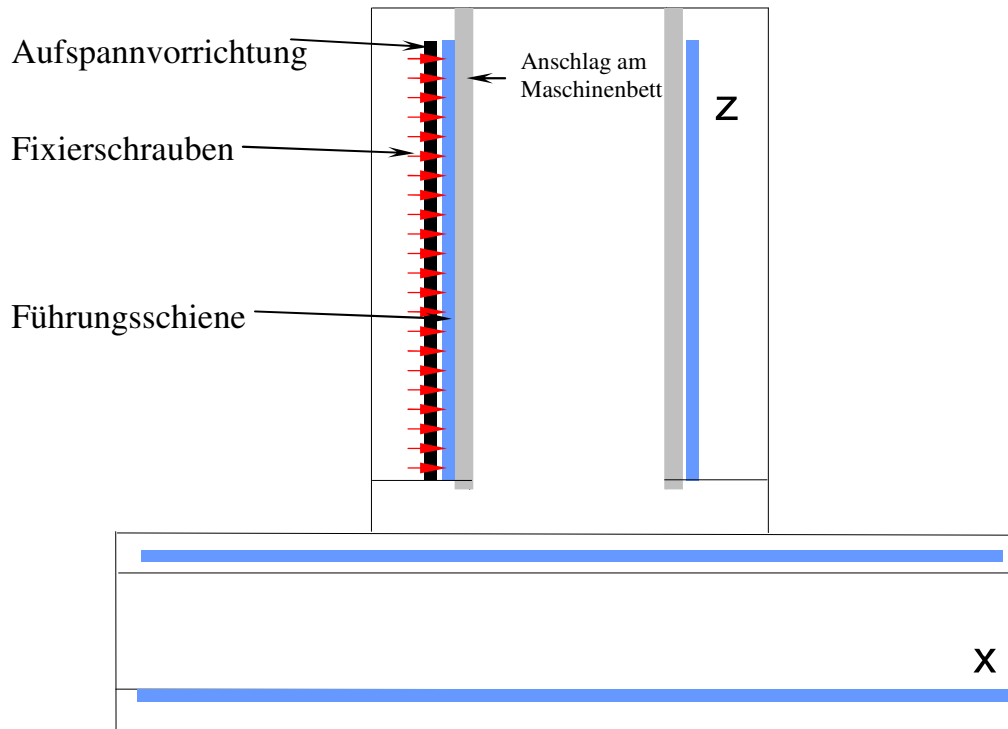


Abbildung 4.3 Prinzipskizze der Fixiereinrichtung zur Montage der Z-Führungsschienen

Die Abbildung 4.3 zeigt ein Bild der Y-Schienenfixiervorrichtung. Die deutlich hervorstehenden Schraubenköpfe dienen dazu, die Fixiervorrichtung auf das Maschinenbett zu schrauben. Unten auf dem Bild sieht man zwei der Zylinder, die den seitlichen Druck auf die Führungsschiene ausüben, und sie damit gegen den Anschlag am Maschinenbett drücken.

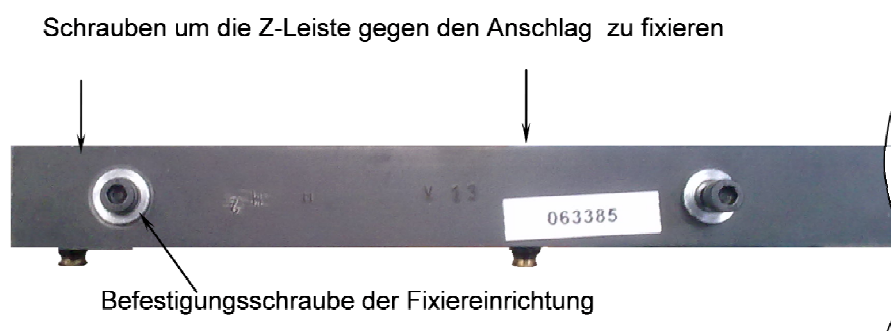


Abbildung 4.4 Linke Seite der Fixiervorrichtung

Die Führungsschiene wird von der Mitte nach außen, mit den Schrauben (M8x30-12.9) leicht angezogen. Es folgt nun das Anziehen mit dem vorgeschriebenen Anzugsmoment von 41 Nm, ebenfalls von der Mitte der Führungsschiene nach außen, damit sich so die Spannungen der Führungsschiene in Z-Richtung, nach außen abbauen können. Die roten

Pfeile in Abbildung 4.3 symbolisieren die Schrauben zum Fixieren der Linearführungsschiene. Der Vorteil hierbei ist, dass mit der Fixiervorrichtung die relativ schwere und ohne einen Hallenkran nicht händelbare Montagevorrichtung eingespart wird. Damit ist es nicht nur einfacher die Führungsschiene auszurichten, sondern ermöglicht es dem Monteur vom Hallenkran unabhängig zu arbeiten. Die hierbei erzielte Genauigkeit war bis jetzt ausreichend. Mit einer weiteren Montagevorrichtung würde man wahrscheinlich eine höhere Genauigkeit erzielen. Es wäre aber mit hohen Anschaffungskosten und einem komplizierteren Montageprozess verbunden.

Als nächster Schritt erfolgt die Vermessung der Führungsschienen. Um zu überprüfen ob das Maschinenbett einer Nacharbeit bedarf, wird die montierte Leiste mit dem Autokollimationsfernrohr⁶⁵ auf ihre Geradheit überprüft. Hierfür werden die Führungsleisten auf das Maschinenbett geschraubt und mit dem Fernrohr vermessen. Falls die Abweichung der Führungsbahn in X- und Y-Richtung außerhalb des zulässigen Toleranzwerts liegt, muss geklärt werden, ob das Maschinenbett an der Waldrich- Führungsbahnschleifmaschine nachgeschliffen werden muss. Befinden sich alle Messwerte innerhalb der zulässigen Toleranz, kann die Montage fortgesetzt werden. Für die nachfolgende Messung kommt der Messtaster zum Einsatz. Um bei den Messungen ein Ergebnis nahe an dem der späteren Schleifmaschine zu messen, wird eine Messsäule auf die Führungswagen der Z-Achse geschraubt. Die Messsäule entspricht sowohl in Form als auch im Gewicht der späteren Maschinensäule.

Für die Messung wird ein am Spindelkopf befestigter Messtaster mit der Z-Achse von der einen Endlage zur anderen über einen Messbalken verfahren. Der Messbalken, der quer über der X-Achse liegt, wird mit Hilfe einer Vorrichtung so eingestellt, dass der Anfang und das Ende vom Messbalken die gleiche Höhe aufweisen und das Messgerät auf Null gestellt werden kann.⁶⁶ Die Messsäule wird bei diesem Vorgang von Hand verschoben. Beim Abfahren der Z-Achse wird so das Höhenprofil über den zeitlichen Verlauf aufgenommen. Bei der Aufnahme der Messwerte sollte die Z-Achse einmal vor- und wieder zurückbewegt werden. Mit dieser Methode ist es möglich, die Umkehrspan-

⁶⁵ Vergleiche Kapitel 3.2 Das Autokollimationsverfahren auf Seite 40.

⁶⁶ Vergleiche Kapitel 3.3 Inkrementaler Messtaster auf Seite 43.

ne⁶⁷ zu ermitteln und zu bewerten. Der Graph sollte idealerweise genau spiegelbildlich zurück verlaufen. Die Abbildung 4.5 zeigt den Aufbau der Messapparatur.

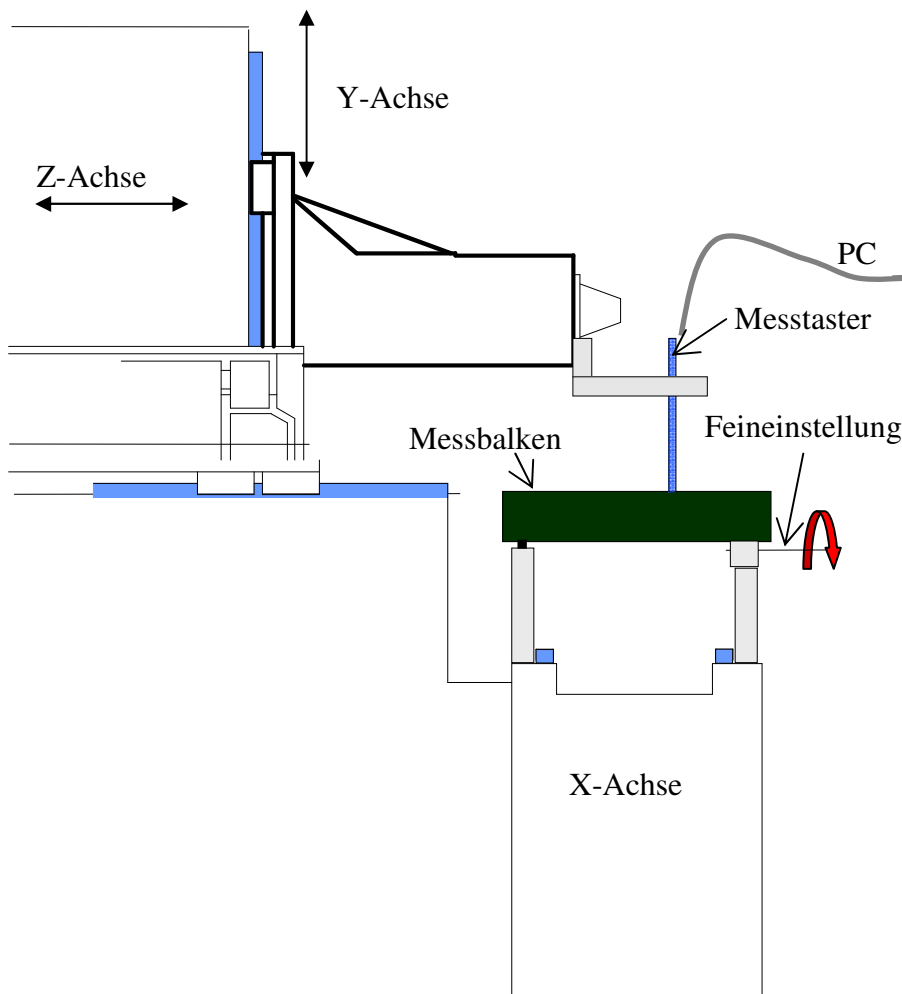


Abbildung 4.5 Messaufbau der Z-Achse, Aufbau mit Messbalken⁶⁸ und Messtaster⁶⁹

Als Ergebnis der Messung erhält man aus der Geradheitsabweichung der beiden Z-Schienen einen Geradheitsverlauf. Der Verlauf gibt die Fehler beider Führungsbahnen in einem Ergebnis wieder. Fahren zwei Führungswagen an gleicher Längenposition an der einen Schiene eine konvexe, und die anderen in eine konkave Form gleicher Höhe ab, kann es sein, dass sich diese beiden Formabweichungen am Messbalken aufheben. Bei der späteren Anpassung dieser Achse wird dieser Zusammenhang allerdings nicht berücksichtigt. Das aufgenommene Profil wird beim Einschleifen des Werkzeugtisches,

⁶⁷ Siehe im Glossar unter A2.23 Umkehrspanne auf Seite 149.

⁶⁸ Siehe im Glossar unter A2.12 Künstliche Alterung auf Seite 145.

⁶⁹ Vergleiche Kapitel 3.3 auf Seite 43.

mit dem Winkel des Tisches in Querrichtung, auf diesen übertragen. Da die Messung dieser Achse lediglich in Y-Richtung erfolgt, könnte es sein, dass beim Abfahren der Z-Schiene mit der Spindel ein Kippen in X-Richtung erfolgt, weil dies ist jedoch für den Planschleifprozess weniger wichtig ist, wird dieser Fehler nicht gesondert betrachtet. Im Vergleich zu der X-Achse ist die Z-Achse unproblematisch. Das liegt unter anderem an den zuvor erwähnten Zusammenhängen und der Tatsache, dass die Führungsschienen sehr viel kürzer sind.

Die Messung an der Spindel ist sehr nah an der Genauigkeit der späteren Schleifmaschine. Abweichungen die hier gemessen werden, treten später auch am Werkstück auf. Sämtliche geometrische Einflüsse gehen auch hier ein. Beim Korrekturprozess des Schleifens kann es jedoch vorkommen, dass Geradheitsfehler des Messbalkens auf die Führungsschiene der Maschinenachse übertragen werden.

Automatische Anpassung des Messdiagramms

Das Ausrichten des Messbalkens bei der Achsenvermessung ist zeitaufwendig. Es stellt sich die Frage, ob diese Ausrichtung überhaupt manuell geschehen muss oder ob sie durch eine Softwarelösung überflüssig sein könnte. Für eine Messung des Geradheitsverlaufs der Z-Achse ist es bis jetzt erforderlich den Anfangs- und Endpunkt des Mess-tasters Null zu setzen. Dies geschieht mit Hilfe eines Messaufbaus, der - wie in Abbildung 4.5 gezeigt - über eine Stellschraube eingestellt wird. Problematisch ist, dass der Aufbau nicht am Anfang des Balkens ansetzt, sondern der Balken an beiden Enden über den Aufbau hinaus ragt. Um den Messtaster dennoch am Anfang und am Ende auf Null zu setzen, muss erst die eine Seite Null gesetzt werden, dann die andere. Dabei verliert die erste Seite jedoch wieder den Nullpunkt. Der Einstellprozess kann nach Angaben eines Monteurs bis zu einer Stunde dauern.

Als Alternative wurde innerhalb dieser Arbeit ein Excel Dokument⁷⁰ erstellt, das die gespeicherten Daten der Z-Achsenmessung einlesen kann und auswertet. Die Ausrichtung des Graphen erfolgt mittels der trigonometrischen Funktionen. Hierbei wird als erstes der Anfangs- und Endwert bestimmt. Der Anfangswert ergibt sich relativ einfach, da er bei $t=0$ liegt und durch den Vorlauf die Tangentensteigung Null besitzt. Der End-

⁷⁰ Vergleiche Anhang A4 (CD).

wert liegt in etwa der Mitte des Graphen, weil während der Messaufnahme der Messfühler einmal hin und danach wieder zurück geführt wird⁷¹ und hat ebenso eine Steigung von „0“. Eine Messung von der einen Seite angefahren, unterscheidet sich auf Grund vom Lagerspiel immer von der Messung in anderer Richtung. Um nun den Endwert bestimmen zu können, summiert die Tabelle jeweils blockweise 20 Messwerte (Spanne einstellbar) auf und vergleicht deren Abweichung untereinander. Sind die Werte alle gleich, kann davon ausgegangen werden, dass die Messeinrichtung ruht, also der Balken ans Ende gefahren wurde und nun einen Moment in dieser Position verharret. Als nächstes wird der Balken wieder in die Ausgangsposition zurückgeschoben. Dieser Wert ist der letzte und stellt den Endpunkt der Messung dar. Die Werte werden nun in Excel angezeigt und dienen weiterer Berechnungen. Im nächsten Schritt wird die Steigung oder das Gefälle des Graphen ermittelt. Das geschieht mit Hilfe der eben erwähnten Punkte, über die mit der Tangensfunktion sowohl die Steigung als auch das Gefälle bestimmt werden kann. Mit dem errechneten Winkel lässt sich die Verschiebung zu den einzelnen Zeitpunkten ermitteln. Im weiteren Verlauf wird der Wert dieser zu den Messergebnissen addiert oder abgezogen.

Der gesamte Anpassungsprozess des Graphen erfolgt automatisch und das Ergebnis kann übersichtlich ausgedruckt werden. Eine Anpassung für die Messcomputer wäre eventuell erforderlich. In Versuchen hat sich gezeigt, dass die automatisch ausgerichteten Graphen den manuell ausgerichteten in nichts nachstehen. Der durch die automatische Ausrichtung entstandene Fehler geht gegen Null, weil der Graph durch den Aufbau an sich schon relativ präzise ausgerichtet ist.

⁷¹ Mit diesem Verfahren wird die Umkehrspanne bestimmt. Diese dient der Ermittlung des Messfehlers und der Überprüfung des Messtasters.

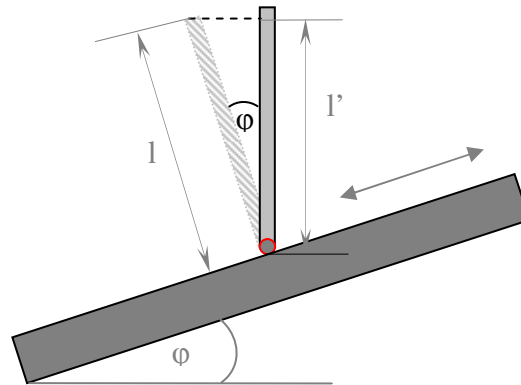


Abbildung 4.6 Bestimmung des Messfehlers

Abbildung 4.6 veranschaulicht eine Kippung des Messbalkens φ und die damit verbundene Winkelabweichung φ von der Orthogonalität zwischen Messtaster und Messbalken. Aus diesem geometrischen Zusammenhang ergibt sich eine reduzierte Auslenkung des Messeinsatzes, hier als Verkürzung der Länge des Messtasters l' dargestellt.

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich für die Auslenkung l' folgende Formel:

$$l' = \cos \varphi \cdot l \quad (4.1)$$

Bei Verkippung des Messbalkens ist die gemessene Auslenkung immer kleiner als die reale. Durch den verwendeten Messaufbau und der ausgerichteten Y-Achse ergibt sich im unausgerichteten Zustand eine angenommene Maximalsteigung von $1000 \mu\text{m}/\text{m}$. Die Umrechnung von der Steigung nach Grad erfolgt nach der Abbildung 4.7 und Formel (4.2):

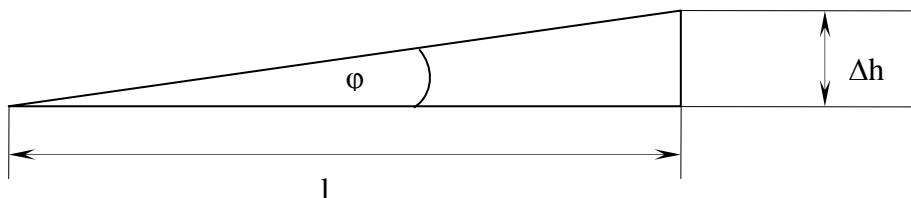


Abbildung 4.7 Umrechnung Steigung in Grad

$$\varphi = \arctan \frac{\Delta h}{l} \quad (4.2)$$

Für eine Steigung von $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ ergibt sich ein Winkel φ von $0,057^\circ$ und somit eine Längendifferenz von -1% . Eine Kompensation über eine Software oder die Excel Tabelle ist allerdings unproblematisch.

5 Bewertung der aktuellen Messverfahren

Jedes Messverfahren ist toleranzbehaftet. Darüber hinaus ergeben sich durch die Art der Anwendung und durch die Kombination mit Messhilfsmitteln weitere Störgrößen, die sich negativ auf die Genauigkeit auswirken können. Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit war es, die einzelnen Messverfahren zu untersuchen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Messverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt und bewertet werden.

5.1 Bewertung Balkenmessung

Die Messung mit dem Messtaster am Messbalken hat den großen Vorteil, dass sie im Gegensatz zur Messung mit dem Autokollimationsfernrohr und der elektronischen Neigungswaage die gesamte Länge der Linearführung abdeckt und keine Schrittweitenunterteilung benötigt. Auch ist die Messung am Messbalken nicht folgefehlerbehaftet.

Durch manuelle Bewegung der Messeinrichtung ist der Geschwindigkeitsverlauf nicht so linear wie bei einer motorgetriebenen Bewegung. Ebenso erfolgt die Krafteinleitung nicht an derselben Stelle wie bei der fertig gestellten Maschine.

Die Abbildung 5.1 zeigt die Verläufe zweier Graphen bei manueller Bewegung. Trotz des Versuches eine möglichst gleichmäßige Bewegung hinzubekommen, weisen beide Graphen einen deutlichen Versatz voneinander auf. Die Bewegung weist beim Anfahren keine Geschwindigkeit auf. Der erste Teil des Graphen ist darum immer durch eine Beschleunigungsstrecke gekennzeichnet.

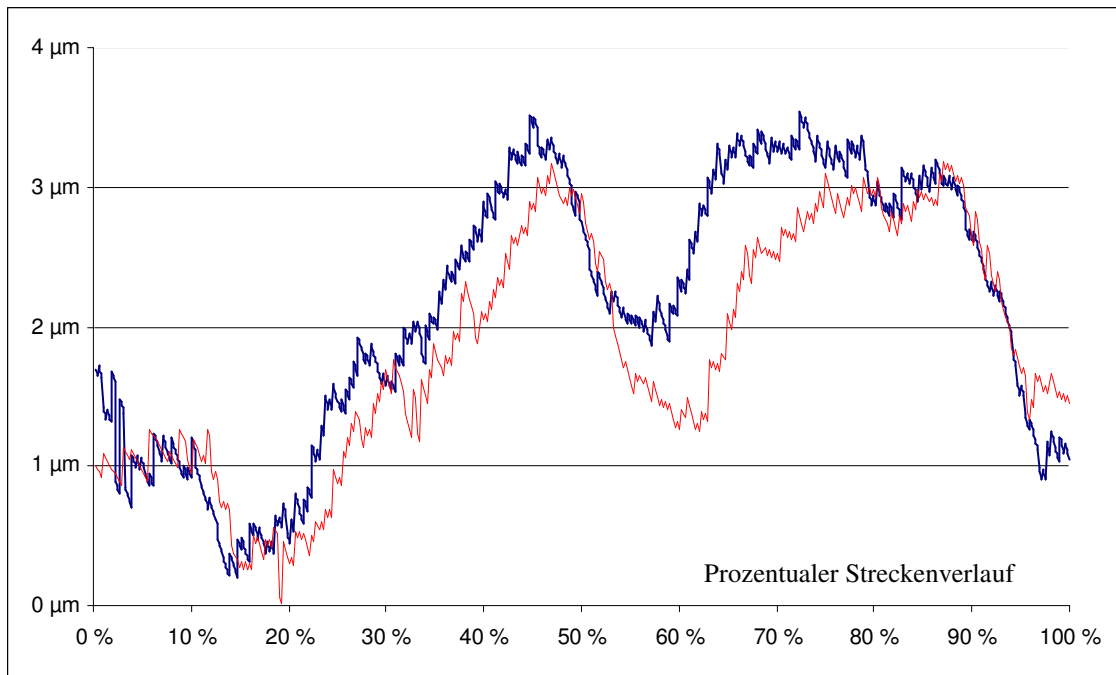


Abbildung 5.1 Einfluss der manuellen Führung

Abbildung 5.1 zeigt zwei Messungen unter gleichen Bedingungen. Trotz des Versuchs einen gleichmäßigen Geschwindigkeitsverlauf zu erreichen, zeigt sich eine deutliche Verschiebung zwischen den beiden Graphen, der die Vergleichbarkeit der beiden Messungen erschwert.

Ein weiterer Nachteil der Balkenmessung ist, dass dieses Messverfahren immer vom Messbalken und seiner Genauigkeit abhängt.

5.2 Genauigkeit der Messmittel

Die Genauigkeit der Messbalken beträgt etwa 1-6 µm, je nach Ausführung. Da dieser Wert sich auf ein neues, unbenutztes Produkt bezieht, ist er mit großer Vorsicht zu genießen. Ein aktuelles Prüfzertifikat sollte vorhanden sein. Die Messbalken verschleifen relativ schnell, da sie während des Montageprozesses Reibung ausgesetzt sind. Eine Schädigung ihrer Oberfläche ist somit auf Dauer kaum zu vermeiden. Ist die Oberfläche in ihrer Ebenheit außerhalb oder nahe an der geforderten Toleranz (4-5µm), so muss der Messbalken nachgearbeitet werden. Eine ungenaue Oberfläche des Messbalkens kann somit zu einer fehlerbehafteten Anpassung der Führungsschiene führen. Daher sollte der Messbalken immer deutlich genauer sein als die zulässige Toleranz der Führungsbahn. Bei Messungen innerhalb der Montage wäre ein Messbalken mit <2µm Toleranz geeig-

net. Es kann auch helfen dem Messbalken ein Prüfzertifikat beizulegen. So ist der Monteur in der Lage schlechtere Bereiche des Messbalkens mit dem Messgerät zu umfahren oder diese im Messergebnis zu erkennen.

Bei den Überprüfungen der Messmittel zeigte sich, dass der für die Z-Achse verwendete Messbalken und der Messwinkel für die Y-Achse eine Abweichung von $4\ \mu\text{m}$ in der Geradheit aufwiesen. Bei einer geforderten Genauigkeit der Y-Achse von unter $5\ \mu\text{m}$ ist dieser Wert recht groß.

Bei dem verwendeten Messwinkel kam zu seiner geringen Genauigkeit noch hinzu, dass dieser eine Toleranz von $4\ \mu\text{m}$ in der *Ebenheitstoleranz* aufwies. Gefordert sind allerdings weniger als $5\ \mu\text{m}/\text{m}$, also eine *Steigungstoleranz*. Bei einer Länge von $160\ \text{mm}$, käme rechnerisch eine maximale Steigungstoleranz von $25\ \mu\text{m}/\text{m}$ heraus. Dies liegt um den Faktor 5 über der geforderten Genauigkeit.

Die Abschätzung der Geradheitstoleranz⁷² kann mit dem Strahlensatz erfolgen. Die so erhaltene Steigungstoleranz erfasst den maximalen Wert, weil das Dreieck vom Minimum zum Maximum gespannt wird.

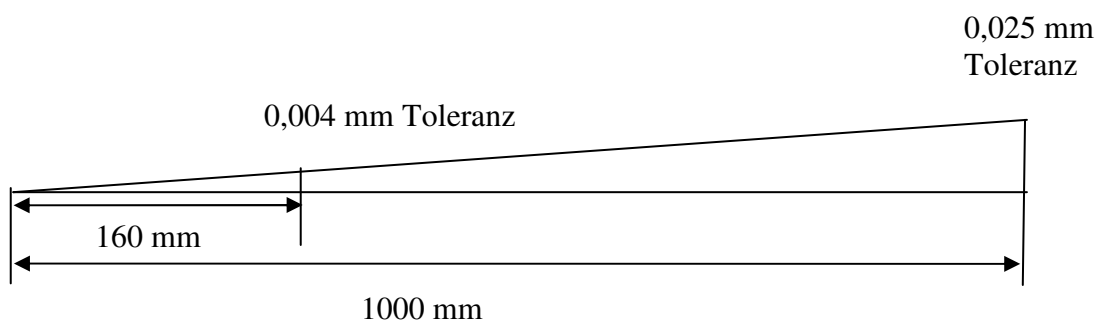


Abbildung 5.2 Anwendung des Strahlensatzes auf die Toleranz

Nach Abbildung 5.2 käme der Messwinkel so auf eine Steigungstoleranz von maximal $25\ \mu\text{m}/\text{m}$. Im Versuch ließ sich die Ungenauigkeit deutlich nachweisen, da man beim Abfahren des Winkels mit einer elektronischen Neigungswaage an jedem Punkt des Winkels einen anderen Wert erhielt. Der Wert schwankte deutlich über $10\ \mu\text{m}/\text{m}$, was bei einer geforderten Genauigkeit von $4\ \mu\text{m}/\text{m}$ nicht tolerierbar ist. Für die folgenden Messungen wurde der Messbalken gegen einen genaueren getauscht und der Messwin-

⁷² Vergleiche Kapitel 2.5.1 Geradheitstoleranz auf Seite 23.

kel zur Nacharbeitung geschickt. Da bei dem Winkel der Y-Achse nur selten Probleme auftraten ist die geforderte Toleranz von $4 \mu\text{m/m}$ zu hinterfragen. Falls diese dennoch notwendig ist, wäre eine Genauigkeit des Messmittels von $2\text{-}3 \mu\text{m/m}$ ausreichend. Die sehr hohe Genauigkeit der Neigungswaage von deutlich unter $1 \mu\text{m/m}$ erhöht die Messunsicherheit nur gering.

5.3 Einflussfaktoren auf die Messung mit der elektronischen Neigungswaage

Die größten Probleme bereiten die Messungen an der X-Achse, an der das Messverfahren der elektronischen Neigungswaage zum Einsatz kommt. Um bewerten zu können, ob eine Korrektur der Linearführung zum Erfolg geführt hat, muss das Messverfahren reproduzierbar sein. Ist die Streuung zu groß, kann keine Aussage über einen Erfolg einer Korrektur getroffen werden. Betrachtet man an dieser Stelle auch noch den Einfluss der Schwingungen und der Temperaturdifferenz, ist als besonders kritisch die Abweichung in Längsrichtung zu betrachten, weil Ergebnisse der Einzelmessungen aufeinander aufbauen und sich somit die Fehler aufaddieren. Die theoretisch maximale Abweichung errechnet sich über die Anzahl der Messschritte, multipliziert mit dem maximalen Fehler. In diesem Fall wäre es bei 10 Messschritten je Meter ein maximaler Fehler von $3 \mu\text{m/m}$.

In der Praxis ist die Genauigkeit des Messverfahrens von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Das genaue Anfahren der Messstelle.
- Die Anzahl der Messpunkte.
- Die Länge der Prüfplatte und damit Δs .
- Der Temperatureinfluss auf das Messgerät.
- Der Temperatureinfluss auf das Maschinenbett.
- Das verspannungsfreie Aufbringen der Messplatte.
- Die Belastung der Prüfplatte.
- Die Schwingungen an der Maschine.

- Die Staubbelastung.

Wiederholgenauigkeit bei Messungen

Um die Wiederholgenauigkeit bei Messungen mit der elektronischen Neigungswaage zu bestimmen, wurden schnell hintereinander folgende Messungen bei gleicher Temperatur durchgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft zwei Ergebnisse dieser Messungen. Zwischen den Messungen wurden die Führungsschienen weder nachgearbeitet noch entfernt. Somit sollten die Messergebnisse nicht voneinander abweichen dürfen.

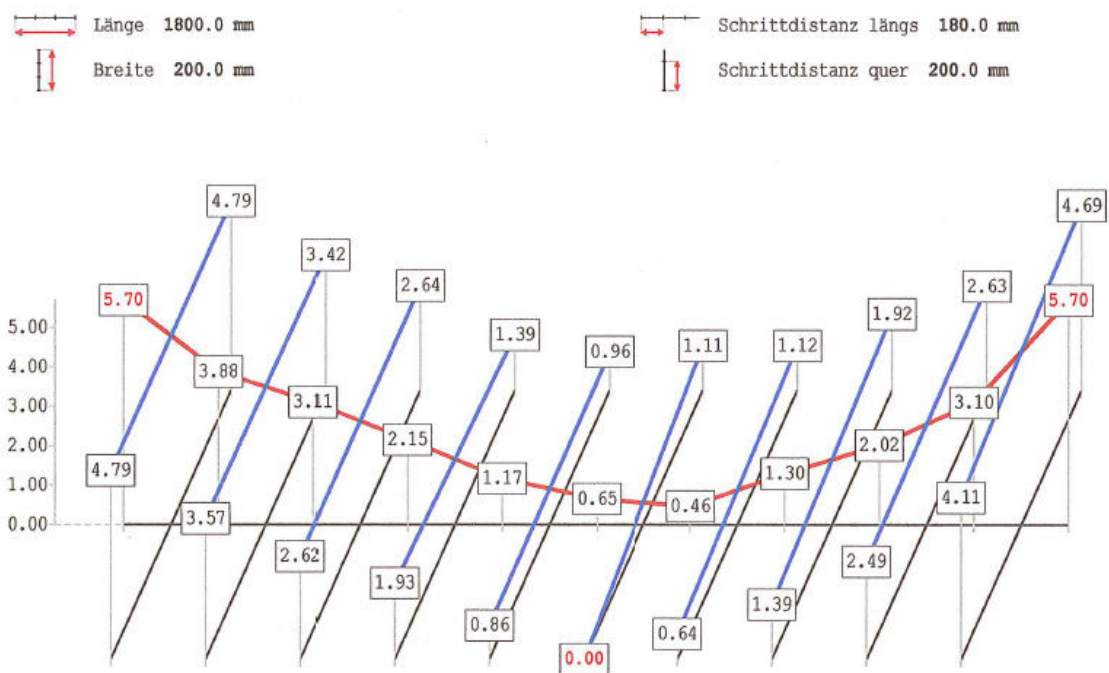


Abbildung 5.3 Wiederholungsmessung 1

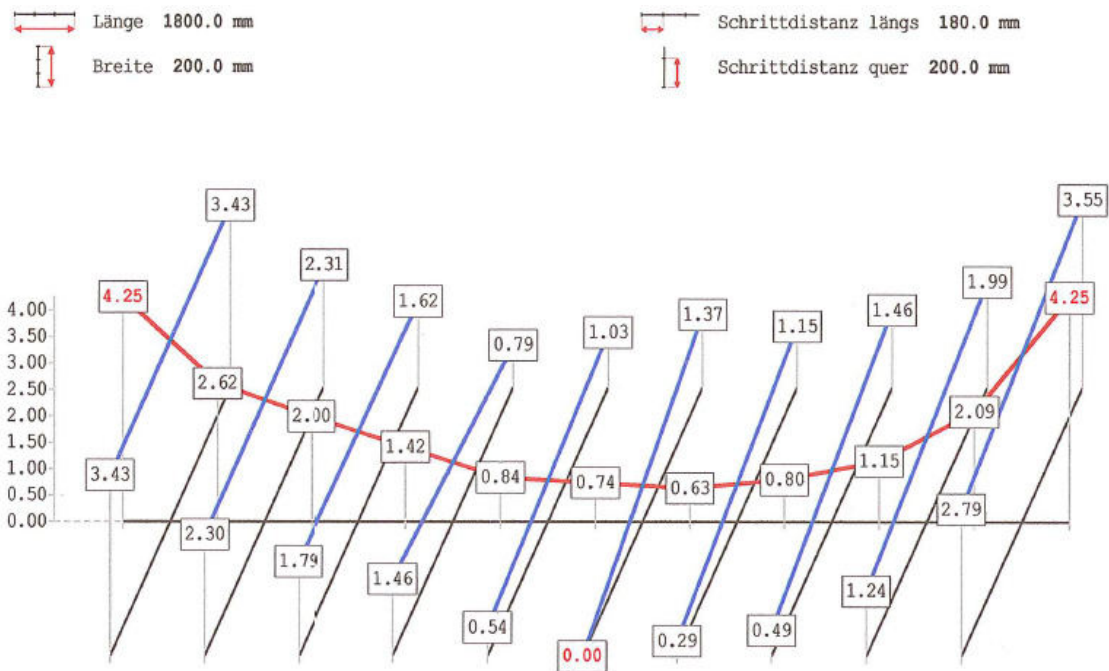


Abbildung 5.4 Wiederholungsmessung 2

Zwischen den beiden Messergebnissen zeigen sich Unterschiede von über einem Mikrometer, obwohl sich der Verlauf stark ähnelt. Betrachtet man nur die beiden Extrempunkte, so beträgt die Differenz knapp $1,5 \mu\text{m}$, was etwa einem Drittel der zulässigen Toleranz von $4 \mu\text{m}$ entspricht. Auch wenn der Fehler relativ groß ist, kann das Messverfahren wegen der Gleichförmigkeit der Kurvenverläufe dennoch gut zum Aufspüren von lokalen Extremstellen für die Nacharbeit herangezogen werden.

In weiteren Versuchen hat sich jedoch gezeigt, dass eine Aussage über die Qualität der Führungsbahn komplex ist. Mehr zu diesem Thema folgt in Kapitel 6, Untersuchung der Formabweichungen.

Die Messung an der X-Achse der Schleifmaschine ist sehr schwierig, da hier in Bereiche sehr hoher Genauigkeit vorgestoßen wird, und diese von sehr vielen Einflussfaktoren abhängig ist. Das wichtigste Messverfahren an der X-Achse ist zurzeit die elektronische Neigungswaage.

An dieser Stelle wird näher auf die Messung an der X-Achse eingegangen, die Angaben gelten jedoch analog auch für die anderen Achsen.

Mit dem aktuellen Messaufbau (Abbildung 4.2) wird versucht, durch die Messung an einer Prüfplatte, auf die Führungsbahnabweichung des späteren Maschinentisches zu

schließen. Die nachfolgende Abbildung 5.5 veranschaulicht quantitativ die Größe der Prüfplatte im Vergleich zum Maschinentisch.

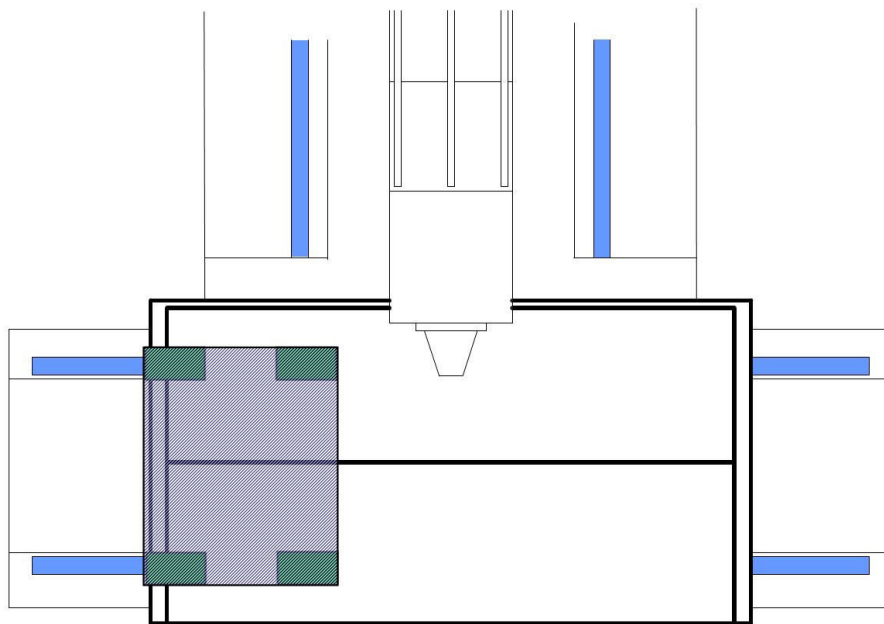


Abbildung 5.5 quantitativer Größenvergleich der Prüfplatte zum Schleifmaschinentisch

Je nach Maschinentyp der PLANOMAT variiert die Größe der Prüfplatte. Die Größe ist aus verschiedenen Gründen möglichst klein gehalten. Zum einen hat dieser Aufbau den Vorteil, dass die Prüfplatte ohne Hilfsmittel an den Montageort gebracht werden kann. Zum anderen hat eine Prüfplatte nur vier Führungswagen und ist damit schon statisch überbestimmt. Bei einer größeren Platte mit mehr Führungswagen wäre der zur Berechnung nötige Abstand Δs nicht eindeutig definiert. Δs könnte der Abstand zwischen den ersten beiden Wagen oder der Abstand zwischen dem ersten und letzten Führungswagen sein; je nachdem, welcher Führungswagen gerade aufliegt. Eine Winkelberechnung wäre somit nicht möglich, da die Strecke Δs nicht bestimmbar wäre.

5.3.1 Anzahl der Führungswagen

Aus der Theorie heraus wäre eine Prüfplatte mit drei Wagen optimal, da sie dann statisch bestimmt ist. Die Abbildung 5.6 veranschaulicht dieses.

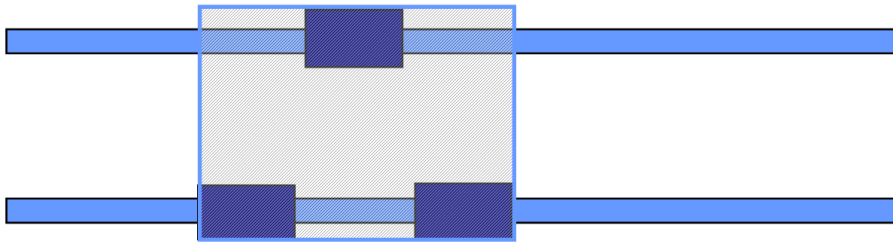


Abbildung 5.6 statisch bestimmte Prüfplatte

Leider wäre bei einer solchen Prüfplatte keine Messung mit der elektronischen Neigungswaage möglich. Bei diesem Aufbau geht lediglich die untere Führungsschiene in die Längsmessung ein. Dieser Prüfaufbau würde sich aber für die Vermessung einer einzelnen Führungsschiene eignen, was allerdings den Zeitaufwand verdoppeln würde. In diesem Fall müsste die Neigungswaage in Querrichtung im unteren Bereich der Platte stehen. Als Messergebnis ergibt sich in diesem Fall ein Geradheitsverlauf der unteren Führungsbahn, da lediglich diese in die Messung mit einfließt.

In der Praxis ist eine Messung mit vier Führungswagen besser geeignet, obwohl dieser Aufbau statisch überbestimmt ist. Es zeigte sich durch viele nacheinander durchgeführte Messungen, dass die Ergebnisse gut reproduzierbar waren. Mit vier Führungswagen ist es außerdem möglich ein Linienbild mit Twist aufzunehmen. Die Führungswagen dürfen in ihrer Position nicht vertauscht werden. Die genaue Position muss festgehalten werden. Bei der späteren Montage werden die Vier Führungswagen in dieser Reihenfolge mit zwei weiteren am Werkzeuggestisch montiert.

5.3.2 Länge der Prüfplatte

Die Länge der Prüfplatte richtet sich nach dem Abstand der Führungswagen des Schleifmaschinentisches. Dieser Zusammenhang wurde so gewählt, damit das Messergebnis mit der Prüfplatte möglichst nahe bei dem des späteren Aufbaus liegt. Die genaue Größe ist die Hälfte des Abstandes der Führungswagen des Maschinenbettisches. Der Abstand wurde halbiert um doppelt so viele Messergebnisse zu erhalten. Ist die Anzahl zu gering, ist die Aussage über die Geradheit zu ungenau. Ist sie zu hoch, vergrößert sich der Summenfehler.

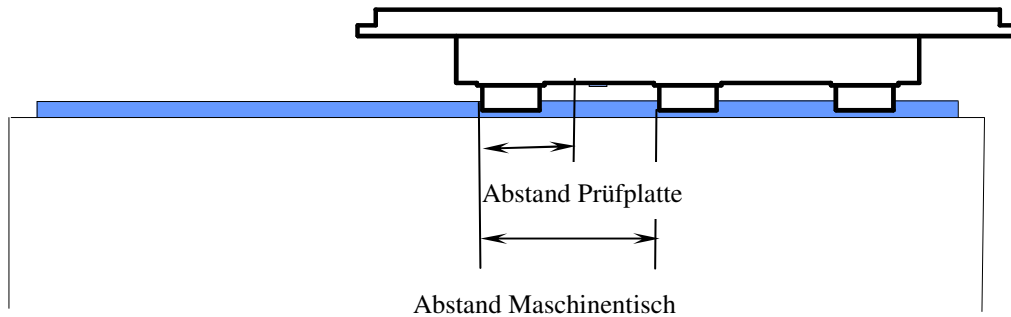


Abbildung 5.7 Vergleich des Abstandes der Prüfplatte und dem des Maschinentisches

Die Halbierung des Abstandes mag für Anzahl der Messpunkte von Vorteil sein, jedoch handelt es sich hierbei um einen Kompromiss. Idealer wäre die Messung mit dem konkreten Abstand, weil die Aussage über eine Kippung des späteren Maschinentisches größer wäre. Da dieser jedoch sowieso drei Führungswagen besitzt, ist es nicht von allzu großer Relevanz. Wichtiger dürfte daher die Anzahl der Messpunkte sein.

Bei der Auslegung der Prüfplatte ist darauf zu achten, dass diese bei der Messung vom Anfang der Führungsbahn bis zum Ende verfahren werden kann, also die Strecke s durch Δs ganzzahlig teilbar ist.

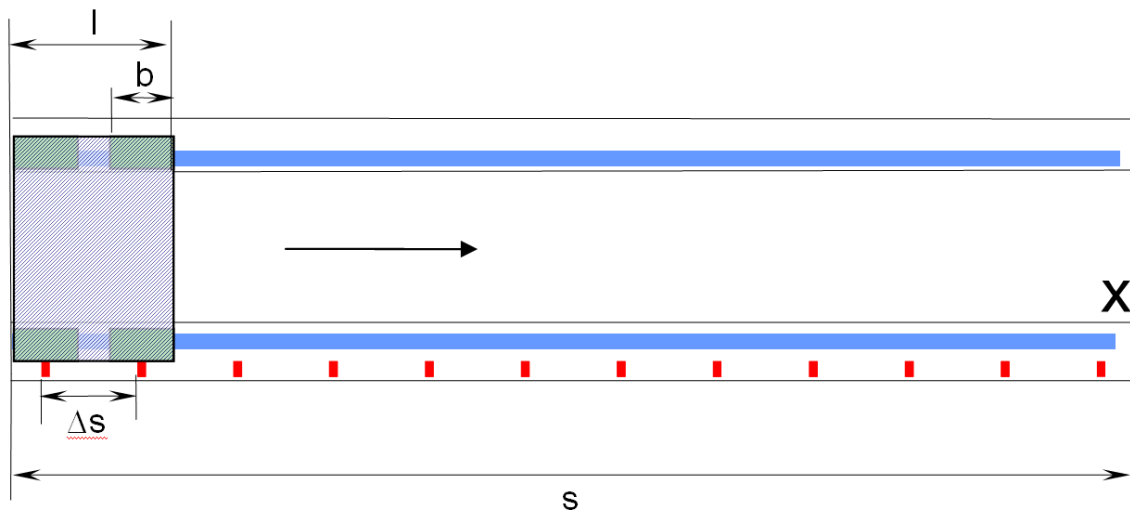


Abbildung 5.8 Bestimmung der optimalen Prüfplattenlänge

Die Abbildung 5.8 zeigt eine Prüfplatte auf der X-Achsenführungsbahn. Die verfahrbare Gesamtlänge der Führungsbahn ist s und die Schrittweite Δs . Die gesuchte Prüfplattenlänge wurde hier mit l bezeichnet, und die Länge des Führungswagens mit b . Beim Verschieben der Führungsplatte nach rechts, darf die Platte immer nur so geschoben werden, dass die Mitte des linken Führungswagens beim Schieben die mittlere Position des

rechten Führungswagens einnimmt. Dieser Zusammenhang kommt dadurch zustande, dass die Mitte des Führungswagens als idealisierter Auflagepunkt angenommen wird.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

Die Gesamtlänge der Führungsbahn s ist die Anzahl n der Segmente mal der Länge der Segmente Δs addiert dem Abstand eines Führungswagens b . Eine Führungswagenlänge wird aufaddiert, da am Anfang und Ende der Führungsbahn jeweils eine halbe Länge hinzukommt.

$$s = n \cdot \Delta s + b \quad \Rightarrow \quad \Delta s = \frac{s-b}{n} \quad (5.1)$$

Die Länge der Prüfplatte l ist die Länge des Segments Δs addiert mit der Länge eines Führungswagens b .

$$l = \Delta s + b \quad (5.2)$$

Nach dem Einsetzen der Formel (5.1) in Formel (5.2) folgt:

$$l = \frac{s-b}{n} + b \quad (5.3)$$

Mit Hilfe der Formel (5.3) lässt sich nun die Länge der Prüfplatte relativ einfach berechnen.

Bei der Vermessung der in der Montage verwendeten Prüfplatten kam heraus, dass diese falsch berechnet waren. Durch Befragung der Monteure wurde deutlich, dass hierdurch Messfehler erzeugt wurden. Da es den Monteuren nicht möglich war den gesamten Bereich mit der Platte abzufahren, wurden die Messpunkte verschoben. Sollte der Messpunkt eigentlich in der Mitte der Führungswagen liegen, so lag dieser so außermit-

tig. Dieses Verfahren kann zu gravierenden Messfehlern⁷³ führen. Nach Absprache mit den Meistern werden die Führungswagen nur noch so verschoben, dass die Start- und Endpunkte der Messung im Mittelpunkt der Führungswagen liegen. Die Randbereiche der Führungsbahn können nun aber nicht mehr betrachtet werden. Sie liegen allerdings sowieso außerhalb des schleifbaren Bereichs.

Das Antragen der Messpunkte erfolgt nun von der Mitte der Führungsbahn nach außen. Der Mittelpunkt der Führungswagen wird markiert und dient als Markierhilfe der Messpunkte, die auf dem Maschinenbett angetragen werden. Ein genaues Antragen und Anfahren der Messpunkte ist insofern wichtig, dass nur dadurch die Messungen präzise miteinander verglichen werden können.

5.3.3 Anzahl der Messpunkte

Die Anzahl der Messpunkte hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Allgemeinen gilt: Je mehr Messpunkte angefahren werden, umso größer wird auch der Gesamtfehler⁷⁴. Wenn aber zu wenige Messpunkte vorliegen, ist die Aussagekraft der Messung zu gering. In Versuchen wurde die Anzahl variiert. Dabei zeigte sich, dass eine Abweichung von den aktuellen zehn Messpunkten keinen entscheidenden Vorteil brachte. Messungen mit wesentlich höherer Anzahl ließen sich schlechter reproduzieren, was an der höheren Anzahl der Einzelfehler gelegen hat. Eine niedrigere Anzahl führte zwar zu einer einfacher reproduzierbaren Messung, war jedoch von geringerer Aussagekraft. Eine mögliche Veränderung bei der Anzahl an Messpunkten zieht auch immer eine Änderung der Prüfplatte mit sich, da diese nur für ihren Abstand Δs verwendet werden darf. Ein anderer Abstand darf mit der gleichen Platte nicht angefahren werden⁷⁵.

5.3.4 Messung im unbelasteten Zustand

Die Messungen an den Führungsschienen finden ausschließlich im quasi unbelasteten Zustand statt. Das Gewicht der Prüfplatte ist naturgemäß wesentlich geringer als das des

⁷³ Vergleiche Kapitel 3.1.2 Messverfahren der elektronischen Neigungswaage auf Seite 27.

⁷⁴ Vergleiche Kapitel 3.1 Elektronische Neigungswaage auf Seite 25.

⁷⁵ Vergleiche Kapitel 3.1.2 Messverfahren der elektronischen Neigungswaage auf Seite 27.

späteren Maschinentischs. Es ist somit anzunehmen, dass Messungen im belasteten Zustand von denen im unbelasteten abweichen. Ein Einflussfaktor stellt die Verformung des Maschinenbettes unter Krafteinwirkung dar. Jedoch wird sich auch die angepasste Führungsschiene deformieren. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Krafteinwirkung. Anpassungen an den Schienen werden mit groben Schleifpapier (Körnungsgröße⁷⁶ 80-120) vorgenommen. Sie beschränken sich allerdings nur auf die Bereiche, die im Messdiagramm einen Maximalwert hatten. Die Anpassung wird so immer genau unter den Führungswagen vorgenommen, wodurch es an diesen Stellen punktuelle Vertiefungen entstehen. Auf der Führungsbahn kommt es zu einer Flächenpressung. Die Deformation an den rauen, geschliffenen Bereichen, wird größer sein, als in den von der Firma INA polierten. Bei Versuchsmessungen an einem belasteten Maschinentisch, konnte dieser Zusammenhang allerdings nicht nachgewiesen werden. Ein mit 200 kg belasteter Maschinentisch wies zwar einen minimal anderen Ebenheitsverlauf auf, lag aber dennoch im geforderten Toleranzbereich. Eine wirkliche Aussage über diesen Zusammenhang kann, auf Grund der geringen Anzahl an geprüften Maschinen, nicht getroffen werden.

5.4 Überprüfung der Ergebnisse einer Neigungswaagenmessung mit einer Balkenmessung

Das Messverfahren mit der elektronischen Neigungsmesswaage lässt einige Fragen offen. Es wird nicht klar, wie die Geometrie zwischen den Messstellen aussieht. Da es nur sehr wenige Verfahren gibt, die auf einem Mikrometer pro Meter genau sind, sind die Möglichkeiten begrenzt. Die Problematik der Messung mit der elektronischen Neigungswaage wird deutlich, wenn man sich die nachfolgende Graphik näher anschaut.

⁷⁶ Siehe im Glossar unter A2.11 Körnungsangabe von Schleifpapier auf Seite 146.

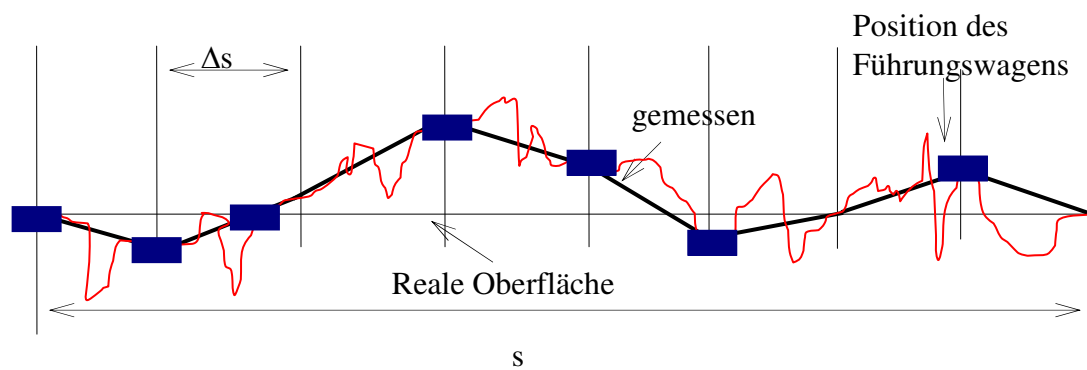


Abbildung 5.9 Problematik nicht erfasster Bereiche bei der Messung mit der elektronischen Neigungsmesswaage

Die Abbildung 5.9 veranschaulicht an einem Beispiel die Problematik einer zu geringen Anzahl an Messpunkten, wodurch ein verfälschtes Bild des geometrischen Höhenprofils erzielt wird. Um zu untersuchen, ob und wie aussagekräftig das Verfahren ist, wurde eine Vergleichsmessung an einem Messbalken durchgeführt.

5.4.1 Aufbau

Die Abbildung 5.10 zeigt den Aufbau der Vergleichsmessung. Die Messung erfolgt an dem, mit Achsen, Spindel und Tisch fertigmontierten Maschinenbett. Die Steuerung, Verkleidung und weiteren Aufbauten fehlen in diesem Fertigungsschritt noch, sind jedoch ohne Bedeutung.

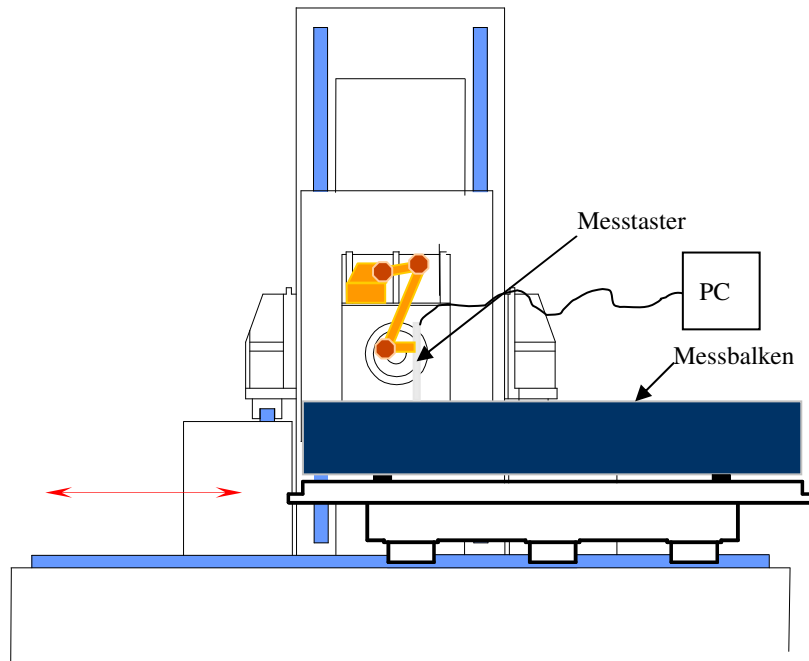


Abbildung 5.10 Aufbau einer Vergleichsmessung

Da dieser Montagezustand der Maschine noch nicht zu weit fortgeschritten ist, eignet er sich ideal zur Qualitätsprüfung⁷⁷ und könnte in den Produktionsprozess integriert werden.

Für die Messung wurde ein Messbalken mit Hilfe des Hallenkrans auf den Maschinentisch gehoben und mittig ausgerichtet. Mit Hilfe eines inkrementellen Messtasters und einem Computer wurde dann ein Höhenprofil der Führung aufgenommen. Der Aufbau wurde so gewählt, weil er dem späteren Anwendungsfall stark ähnelt. Bei der Messung stellt der Messtaster hierbei die Spindel dar, der Messbalken das Werkstück. Beim Abfahren des Tisches von der einen Seite zur anderen werden die Höhenunterschiede der Führung aufgenommen.

5.4.2 Durchführung

Die Messungen fanden an einer PLANOMAT 612 statt. Hierbei handelt es sich um eine Maschine hoher Genauigkeit und sehr langer Führungsbahn. Die geforderte Qualität bei Ausrichtung der X-Achsenführungen liegt unter $4\ \mu\text{m}$ Ebenheitsabweichung auf die

⁷⁷ Vergleiche Kapitel 8.9 Einführung eines qualitätssichernden auf Seite 132.

Gesamtlänge der Führungsbahn. Durch die sehr lange X-Achse und den breiten Abstand der Achsen zueinander, ist die Maschinenachse der PLANOMAT 612 am schwersten zu montieren.

Für die Messungen wurde der Messbalken orthogonal zur Z-Achse und mittig auf dem Maschinentisch ausgerichtet. Nach einer Reinigung der Oberfläche mit speziellem Messbalkenreiniger wurde der Messtaster⁷⁸ an der vorgefahrenen Z-Achse mit Hilfe eines Messmittelhalters befestigt⁷⁹. Beim Aufbau wurde der Spindelträger sehr nahe an den Messbalken herangefahren, damit der Hebelarm des Messmittelhalters nicht allzu lang ist. Die Aufzeichnung der Messung erfolgte mit der Software am PC. Nach dem Start dieser wurde mit dem Messtaster der Messbalken von links nach rechts durch Verschieben des Maschinentisches per Hand abgefahren. Dabei wurde versucht die Bewegung so gleichförmig wie möglich auszuführen. In der handgeführten Messung liegt allerdings auch die Schwachstelle. Die Messwertaufnahme erfolgt über den zeitlichen Verlauf und hat somit leider keinen Positionsbezug. Der Messbalken wurde auf Grund des hohen Gewichts und der Gefahr eine Beschädigung nicht weiter ausgerichtet. Die folgende Auswertung war daher komplexer, da der erhaltene Datensatz mit Hilfe trigonometrischer Funktionen ausgerichtet werden musste.

5.4.3 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte am Computer. Im ersten Schritt wurden die Daten aus dem Messprogramm exportiert. Die so erhaltene Datei wurde dann mit Excel eingelesen und in einem neuen Tabellenblatt abgelegt. Die Ausrichtung des Graphen erfolgte nach dem Ende-Anfangsschema⁸⁰, Hierbei wird der Graph so angepasst, dass Ende und Anfang denselben Y-Wert haben. Die Abbildung 5.11 zeigt den Unterschied zwischen dem aufgezeichneten Graphen und dem parallel zur X-Achse ausgerichteten Graphen.

⁷⁸ Vergleiche Kapitel 3.3 Inkrementaler Messtaster auf Seite 43.

⁷⁹ Vergleiche Abbildung 5.10 Aufbau einer Vergleichsmessung auf Seite 77.

⁸⁰ Vergleiche Kapitel Abbildung 3.8 Ausrichtung nach Endpunkten auf Seite 32.

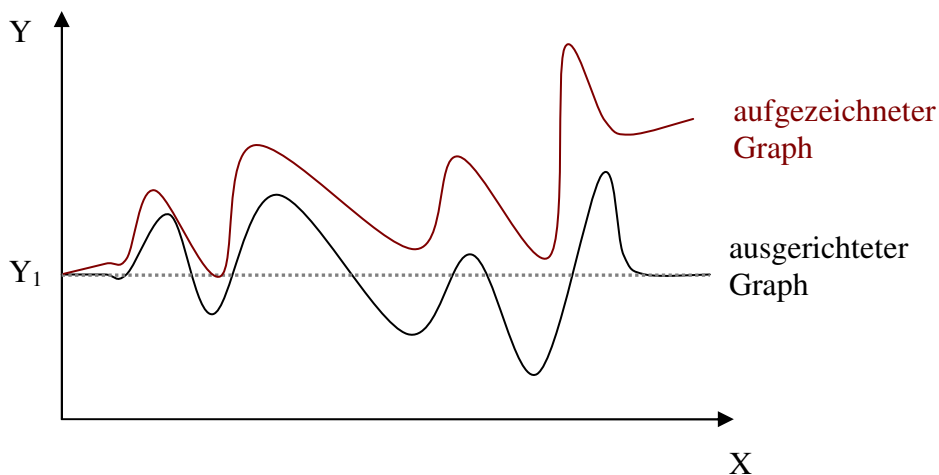


Abbildung 5.11 Ausrichtung des Graphen

Die parallele Ausrichtung wurde mittels einer Reihenrechnung durchgeführt. Hierbei wurde die Tangensfunktion mit dem Strahlensatz⁸¹ kombiniert. Die Ausrichtung erfolgte nach dem in Kapitel 3.1.4.1 erläuterten Verfahren.

Nach der Ausrichtung zur X-Achse kann der Graph nun noch nach oben und nach unten verschoben werden. Das geschieht, indem man den erwünschten Gangunterschied auf alle Messwerte aufaddiert bzw. abzieht. Mit Hilfe im Anhang befindlichen Excel Tabelle ist es möglich, diesen Ablauf innerhalb des Produktionsprozesses komplett zu automatisieren.

5.4.4 Vergleichsmessung mit Messtaster und Messbalken

Der erste Schritt bei der Untersuchung der X-Achse war herauszufinden, wie reproduzierbar das Messverfahren mit der elektronischen Neigungswaage ist. Hierfür wurde die Achse zweimal abgefahren und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die beiden Graphen in einem Diagramm. Sie wurden mittels Excel parallel verschoben und im Winkel zueinander ausgerichtet. Das Vorgehen ist insofern in Ordnung, da es um eine Ebenheitsabweichung geht. Hierbei interessiert vor allem der Abstand zwischen den Extrempunkten und der Verlauf des Graphen. Der angepasste

⁸¹ Vergleiche Abbildung 5.2 auf Seite 66.

Winkel ist für die Messung unerheblich. Die nachfolgende Abbildung zeigt zwei Messungen, die direkt hintereinander aufgenommen wurden.

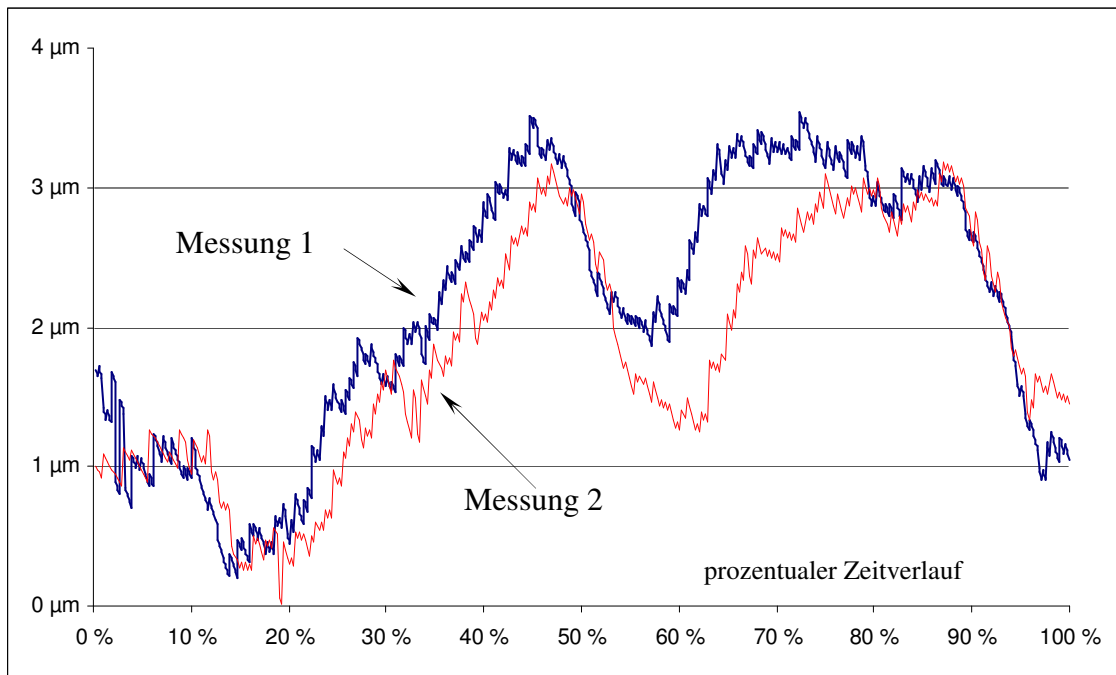


Abbildung 5.12 Darstellung zweier Graphen zur Überprüfung des Messverfahrens

Wie in der Abbildung 5.12 zu sehen, ähneln sich die Verläufe der beiden Graphen sehr. Da der Messtisch per Hand verschoben wurde, ist im linken Bereich des Diagramms eine leichte Verschiebung in X-Richtung zu erkennen. Die X-Achse enthielt ursprünglich die Zeitangabe, wurde jedoch – um die beiden Graphen überlagern zu können – gegen eine relative Achse über die Zeit ausgetauscht.

Zur Kontrolle wurden noch einige weitere Messungen durchgeführt, sie führten zu einem ähnlichen Ergebnis. Das Messverfahren weist also eine hohe Reproduzierbarkeit auf und stellt die Bereiche dar, die bei der elektronischen Neigungsmesswaage verborgen blieben.⁸²

⁸² Vergleiche Kapitel 3.1 Elektronische Neigungswaage auf Seite 25.

5.4.5 Vergleich der Messergebnisse Messtaster und Neigungswaage

Ein Vergleich der Messergebnisse mit denen der elektronischen Neigungswaage ist relativ schwierig.

Die Abbildung 5.13 zeigt dennoch die Messergebnisse der Messtaster und Wyler Neigungsmesswaage im Vergleich. Bei dieser Messung wurde darauf geachtet, dass die Temperatureinflüsse an der Maschine vernachlässigt werden konnten.⁸³

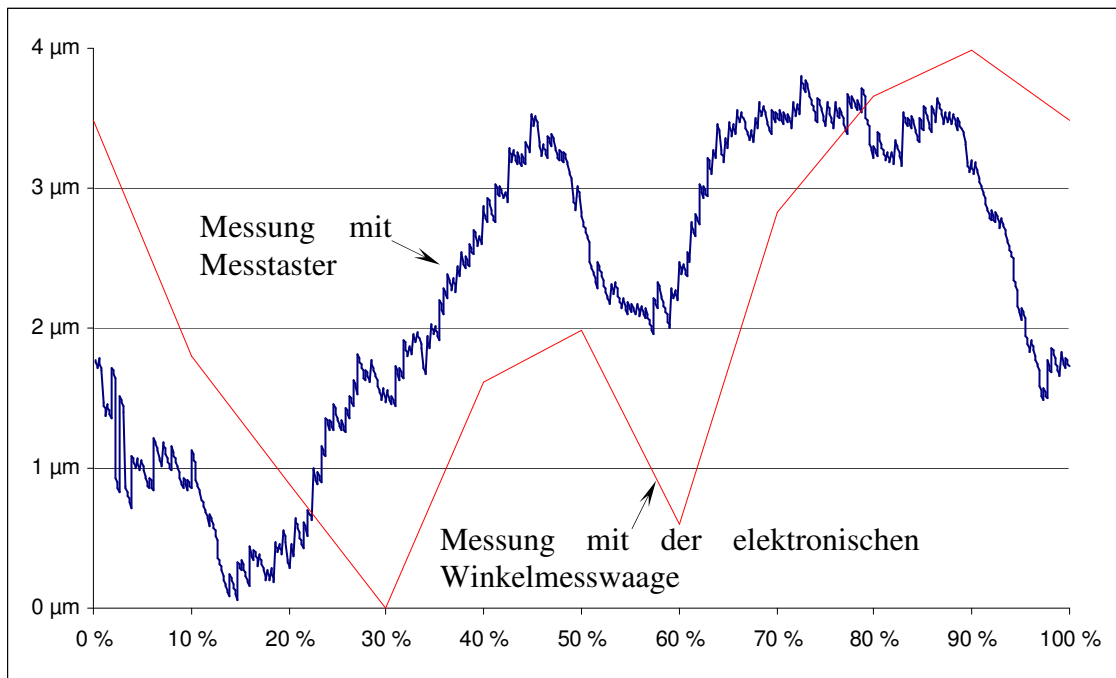


Abbildung 5.13 Vergleich der Messergebnisse des Messtasters mit denen der elektronischen Neigungswaage

Der Graph der elektronischen Neigungswaage ist rot eingezeichnet. Auffallend hierbei ist die sehr grobe Genauigkeit. Die Werte stammen aus dem Messchrieb der LEVELSOFT PRO Software, der Firma Wyler. Verglichen mit dem Graphen des Messfühlers, wirkt der Graph der elektronischen Neigungsmesswaage sehr ungenau, spiegelt aber dennoch die Tendenz wider. Man muss auch bedenken, dass der maximale Unterschied der Messwerte nur wenige Mikrometer beträgt und der Verlauf eine prinzipielle Parallelität aufweist.

⁸³ Eine Übersicht der genauen Temperaturen befindet sich im Anhang A4 (CD).

Bewertung

Der Vorteil der Balkenmessung ist, dass dieser eine wesentlich höhere Auflösung hat. Das Messergebnis hängt großteils von der Geometriegenauigkeit des Messbalkens ab (vgl. Kap. 3.3). In der Regel ist der inkrementelle Messtaster in seiner Auflösung sehr viel genauer als der Toleranzbereich des Messbalkens, der zudem von Schmutz und andern Einflüssen abhängig ist. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Verfahren mit der elektronischen Neigungswaage ist, dass ein lokaler Fehler keinen Folgeeinfluss auf die weitere Messung hat⁸⁴. Durch die höhere Auflösung des Messtasters ist es zudem einfacher, während der Montage der Führungsschienen die Stellen zu finden, an denen nachgearbeitet werden muss. Wie in Abbildung 5.13 zu sehen, ist es durch die sehr grobe Auflösung der elektronischen Neigungswaage nicht immer einfach, die Extremstellen genau zu treffen.

Auch, wenn der Messbalken deutliche Vorteile gegenüber der Messung mit der elektronischen Neigungswaage hat, ist die Messung mit dem Messtaster für die Produktion nur bedingt geeignet. Der hohe Verschleiß und die fehlende Möglichkeit einer Quermessung sind problematisch. Dennoch ist die Messung als Ergänzung sinnvoll und je nach Kosten und Nutzen abzuwägen. Dieser qualitätssichernde Schritt wäre gut in den Produktionsprozess integrierbar. Ist die Maschine an ihren Endmontageort angekommen ist, könnte sie so vermessen werden. Während dieser Fertigungsphase besitzt die Schleifmaschine bereits einen Maschinentisch. Die benötigten Messgeräte befinden sich in der Halle. Eine Einführung wäre somit relativ problemlos.

⁸⁴ Vergleiche Kapitel 3.1 Elektronische Neigungswaage auf Seite 25.

Tabelle 5.1 Vor- und Nachteile der Geradheitsmessung mit dem Messtaster

Vorteile	Nachteile
sehr genau	Genauigkeit der Messung vom Messbalken abhängig
Keine Folgefehler wie bei der elektronischen Neigungswaage	Schwerer Messbalken nötig
Einfach zu interpretierendes Ergebnis	Nur Geradheitsmessung ohne Twist
Sehr hohe Auflösung	
Lückenlose Aufzeichnung	

6 Untersuchung der Formabweichungen

Die Formabweichungen der einzelnen Achsen gehen unterschiedlich in die Gesamtabweichung ein. Die Abbildung 6.1 zeigt die Einzelabweichungen.

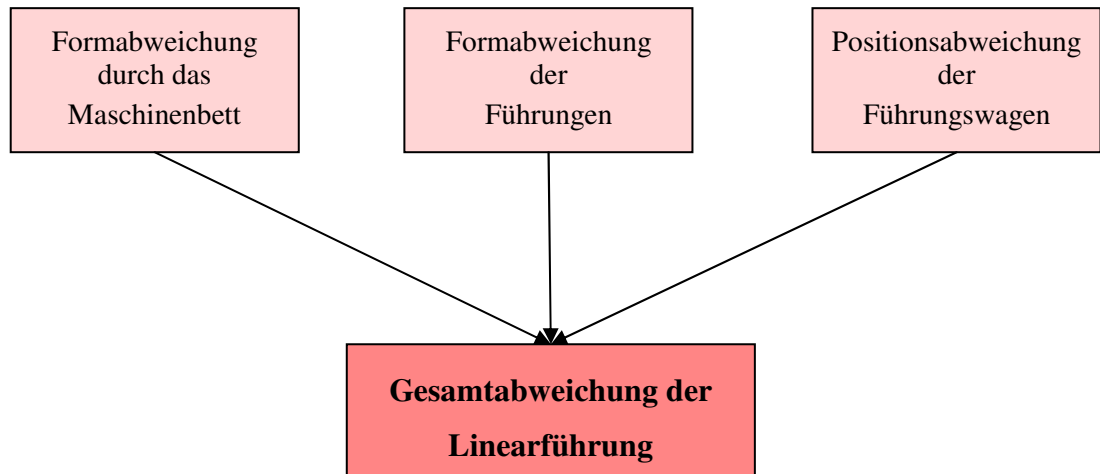


Abbildung 6.1 Einzelabweichungen auf die Gesamtabweichung

6.1 Temperaturdifferenzen

Die Temperatur in der Montagehalle schwankt gerade im Sommer sehr stark. Dies führt zu Formabänderungen im Maschinenbett, die sich bei den Messungen an den Führungen deutlich bemerkbar machen.⁸⁵ Im Tagesverlauf wurden an der X-Achse Unterschiede von über 5 μm in der Ebenheit gemessen. Schwankt die Temperatur am Tag stark, kann es vorkommen, dass sich Nacharbeiten an den Linearführungen zu einem gegenteiligen Resultat führen. Durch die thermisch bedingten Ausdehnungen kann es also vorkommen, dass an den falschen Stellen nachgearbeitet wird.

⁸⁵ Vergleiche Kapitel 7.3 Erläuterung der Temperaturmessung auf Seite 105.

6.2 Führungsbahnabweichungen

Die von der Firma INA bezogenen Führungen erfüllen nicht die Genauigkeit, die von BLOHM eigentlich benötigt wird. Die von der Konstruktion vorgegebenen Toleranzen können daher nur dann erfüllt werden, wenn die Führungsschienen nachgearbeitet werden. Die Nacharbeit an sich ist vorteilhaft, weil sich die Geradheitsabweichung der Führungsbahn aus der Summe der Abweichungen von Maschinenbett und Schiene ergibt. Eine Führungsschiene geringerer Toleranz oder die ausschließliche Nacharbeit dieser, wird daher nicht zum erwünschten Ziel führen.

Es konnte gezeigt werden, dass eine auf einen Messtisch geprüfte Führungsschiene eine Welligkeit zeigte, jedoch sehr gute Werte hinsichtlich ihrer Toleranz im verbauten Zustand aufweisen konnte. Die Geradheit an der Führungsschiene muss also im verspannten Zustand bestimmt werden.

Bei der Montage kommt es immer zu einem Niederschlag von Staub und Verunreinigungen auf dem Maschinenbett. Werden im Messchrieb einzelne Spitzen entdeckt, kann dieses das Anzeichen von einem größeren Staubkorn sein. Es konnte gezeigt werden, dass nach einer gründlichen Reinigung diese scharfen Spitzen im Ausdruck verschwunden waren.

Ein weiterer Einflußfaktor auf die Positionsabweichung an der Führungsschiene können Verspannungen sein. Um diese auszuschließen, sollte die Führungsschiene immer von der Mitte nach außen, in mehreren Durchgängen, mit steigendem Drehmoment angezogen werden.

6.3 Positionsabweichung der Führungswagen

Die Bewegung der Führungswagen erzeugt Schwingungen, die sich im Betrieb als höherfrequente Überlagerung bemerkbar machen. Fehler an den Führungswagen gehen ebenso in das Messergebnis ein, da die Laufrollen nicht ideal rund sind, und auch die Rollenführungen Abweichungen aufweisen.

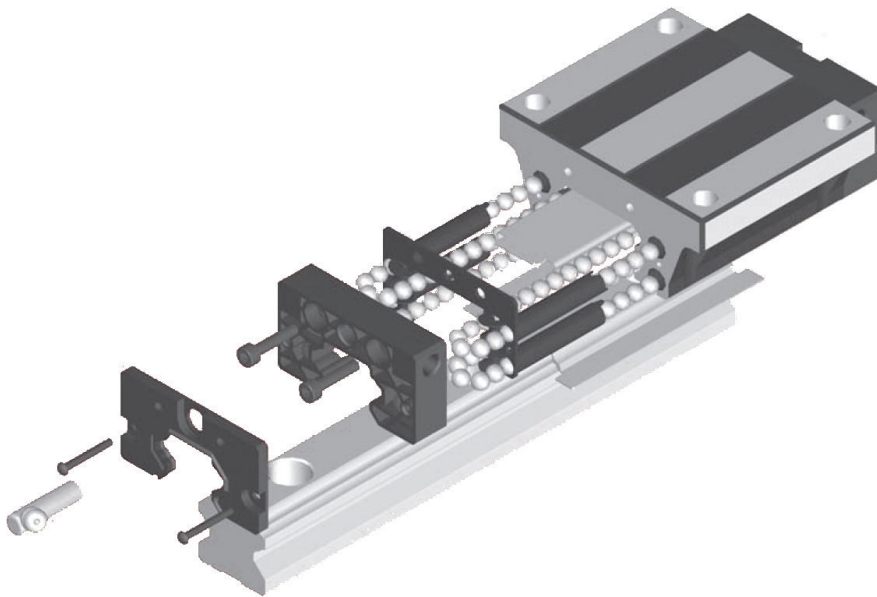


Abbildung 6.2 Aufbau eines Kugelumlaufwagens mit Führungsschiene⁸⁶

Die Abbildung 6.2 zeigt den Aufbau eines Kugelumlaufwagens. Es sind deutlich die umlaufenden Kugeln zu erkennen. Der Einfluss des Führungswagens auf die Genauigkeit wird im Wesentlichen dadurch gegeben, wie präzise dieser eine ideale Führungsschiene abfahren kann. Die Kugelumlaufführung hat zwar den Vorteil einer sehr geringen Reibung und guter Schmierbarkeit, jedoch können diese auch für Schwingungen mitverantwortlich sein.

Bei Messungen an fertig montierten Führungsschienen zeigte sich auch der Einfluss der Größe der Führungswagen. Kleinere Unebenheiten an der Führungsschiene könnte von einem längeren Führungswagen ausgeglichen werden. Eine konkrete Aussage kann jedoch auf Grund der sehr kleinen Stichprobe nicht gemacht werden.

Durch die hohe Anzahl an Kugeln ist der Führungswagen statisch überbestimmt. Daher ist nicht bekannt welche Kugel mit welcher Kraft belastet wird. Auch der genaue Ort der theoretischen Krafteinleitung ist nicht bestimmbar.

⁸⁶ Bildquelle: Dr. Erich Tretter GmbH + Co. Rechberghausen (Hersteller).

6.4 Einfluss des Maschinenbettes

Das Maschinenbett wird im Fertigungsprozess an der Waldrich- Schleifmaschine an den Führungsbahnen geschliffen und einer Qualitätskontrolle unterzogen. Die Genauigkeit der Führungsbahnen ist dabei von zwei Faktoren abhängig:

- Der Präzision des Schliffs
- Materialeigenschaft des Gusses.

Ein Maschinenbett ändert seine Geometrie⁸⁷ nur noch im Nanometerbereich⁸⁸. Allerdings kann sich durch den Prozess des Alterns⁸⁹ schon nach 30 Tagen eine Festigkeitssteigerung um 13% ergeben⁹⁰, welches Formänderungen durch Krafteinwirkung vermindert und somit einen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Eine Möglichkeit die Alterung zu beschleunigen, stellt die „künstliche Alterung“⁹¹ dar.

Transport

Beim Transport ist das Maschinenbett immer wieder Krafteinwirkungen ausgesetzt. Gelagert wird es dabei gemäß Abbildung 6.3 auf Europaletten.



Abbildung 6.3 Transport der Maschinenbetten

⁸⁷ Unter gleichbleibenden Bedingungen.

⁸⁸ Äußere Einwirkungen ausgeschlossen.

⁸⁹ Siehe im Glossar unter A2.1 Alterung auf Seite 142.

⁹⁰ Prof. Dr. Berns, Hans; Prof. Dr. Theisen, Werner: Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen; Springer Verlag Berlin Heidelberg 2008, Seite 158.

⁹¹ Siehe im Glossar unter A2.12 Künstliche Alterung auf Seite 145.

Der Transport hat den Vorteil, dass er die natürliche Alterung durch permanente Lastwechsel beschleunigen kann.

6.5 Setzkraftverlust

Bei der Montage kommt es durch das Anziehen mit dem vorgeschriebenen Drehmoment zu einer Krafteinwirkung auf die Führungsschiene. Durch das Anschleifen der Führungsschiene⁹², mit relativ grobem Schleifpapier (Körnunggröße 80-120), kann es nach einiger Zeit durch den Setzkraftverlust⁹³ zu einer Veränderung der Geradheit kommen. Die Abbildung 6.4 zeigt die Prinzipskizze einer angerauten Stelle in der Vergrößerung.

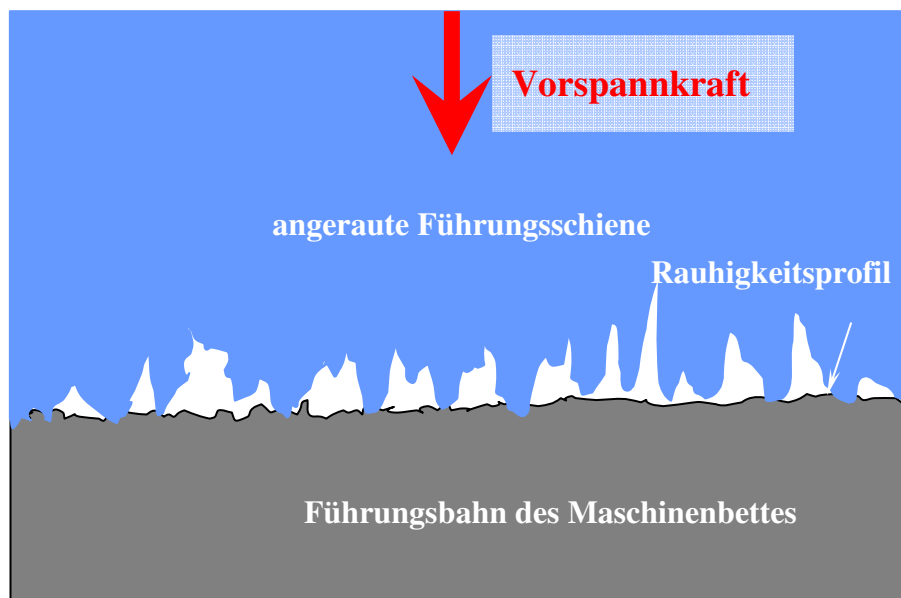


Abbildung 6.4 Prinzip des Setzens an der Linearführung

Die in Richtung des Maschinenbettes wirkende Vorspannkraft F_v bewirkt eine Krafteinwirkung über die Rauhigkeitsspitzen. Wie auch bei Schraubverbindungen, wird es bei der Vorspannkraft nach einigen Tagen zu einem Setzkraftverlust kommen, wodurch sich die Spitzen in ihrer Höhe verringern. Wie groß der Einfluss dieser Formabweichung ist, konnte im Versuch nicht nachgewiesen werden, da die anderen Einflüsse die-

⁹² Vergleiche Kapitel 4.

⁹³ Siehe im Glossar unter A2.19 Setzkraft auf Seite 145.

sen Effekt – im Rahmen der Messtoleranz – überlagert hatten. Bei einem großen Materialabtrag an einer Stelle ist anzunehmen, dass das Setzen einen Einfluss haben wird.

6.6 Untersuchung möglicher Formabweichungen der Linearführungen

Für eine Bewertung der Einzelfehler, in Bezug auf den geometrischen Gesamtfehler wurden zwanzig PLANOMAT Schleifmaschinen untersucht. Hierbei wurde das spezielle Augenmerk darauf gelegt, wie sich die Einzelfehler der Achsen in der Genauigkeit der Endabnahme widerspiegeln.

Die Messdaten befinden sich im Anhang, Teil A3.

Die Auswirkung der Formabweichungen finden sich mehr oder weniger im Schleifergebnis wieder. Am deutlichsten werden die Formabweichungen der X-Achse dadurch, dass am Werkstück Schleifspuren in Z-Richtung auftauchen. Da es sich bei der PLANOMAT-Schleifmaschine um eine Planschleifmaschine⁹⁴ handelt, ist die X-Achse von besonderer Bedeutung. Beim Planschleifen geht es im Wesentlichen um eine gute Oberfläche, bei relativ großer Werkstückgeometrie. Geradheitsabweichungen⁹⁵ der X- und Z-Achse führen so unweigerlich zu Ebenheitsabweichungen am Maschinentisch⁹⁶. Bei besonders großen Werkstücken zeigt sich dieser Fehler sehr deutlich. Wird nur im mittleren Bereich des Werkzeugtisches geschliffen, so sind beispielsweise die Randzonen mit ihren Geometrieabweichungen zu vernachlässigen. Aus den Untersuchungen der fertigen Schleifmaschinen hat sich gezeigt, dass gerade der Randbereich kritisch ist. Auch thermisch ist der Randbereich sehr sensibel. Er erwärmt sich deutlich schneller und kühlt auch schneller ab als der Mittelbereich⁹⁷. Die nachfolgenden Zusammenhänge der Führungsbahnabweichungen gelten für alle Maschinenachsen. Es wird aber besonders auf die X-Achse eingegangen.

⁹⁴ Siehe im Glossar unter A2.17 Planschleifen auf Seite 148.

⁹⁵ Vergleiche Kapitel 2.5.1 Geradheitstoleranz auf Seite 23.

⁹⁶ Vergleiche Kapitel 2.5.2 Ebenheitstoleranz auf Seite 23.

⁹⁷ Vergleiche Kapitel 7 Untersuchung der thermische Einflüsse auf Seite 94.

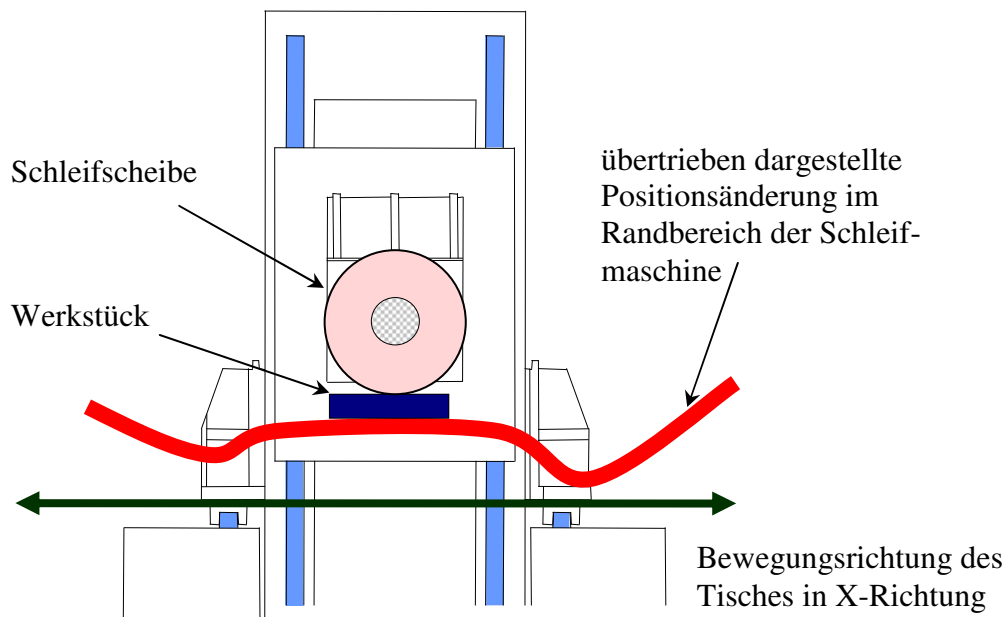


Abbildung 6.5 Auswirkung einer extremen Formabweichung im Randbereich der X-Achse auf ein kleines Werkstück

Die Abbildung 4.1 verdeutlicht den Zusammenhang der Formabweichungen im Randbereich beim Schleifen eines kleinen Werkstücks. Die deutlichen Formabweichungen im Randbereich gehen so nicht in die Werkstückgeometrie ein. Aus dieser Beziehung folgt auch der Schluss, dass der mittlere Bereich der Führungsbahn besonders genau sein sollte.

Ein weiterer, oft positiver Effekt, zeigt sich durch den Werkzeuggestisch an sich. Da dieser an seinen Führungswagen geführt wird, ist seine Position durch diese bestimmt. Eine schmale Formabweichung, die nicht im Bereich der Bewegung des Maschinentisches liegt, bleibt ohne Einfluss auf das Werkstück (vergleiche Abbildung 6.6).

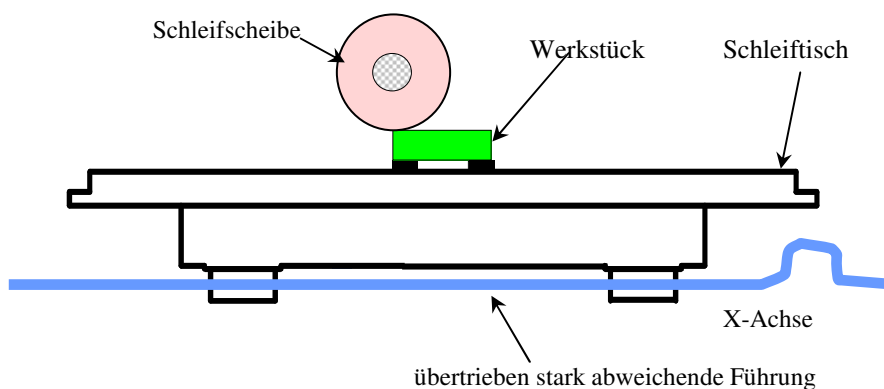


Abbildung 6.6 Vereinfachte Darstellung des Einflusses von Führungsfehlern ohne Einfluss auf das Werkstück

Bei der PLANOMAT-Schleifmaschine kommt hinzu, dass nicht der gesamte Bereich des Maschinentisches geschliffen werden kann. Die Randzonen können daher beim Einschleifen des Maschinentisches lediglich über eine spezielle Vorrichtung erreicht werden. Bei der Anpassung der Führungsschienen sollte dieser Bereich nicht zu kritisch betrachtet werden.

Auf die gesamte Länge der X-Achse darf eine maximale Ebenheitsabweichung von $5\ \mu\text{m}$ nicht überschritten werden. Entscheidend ist hierbei auch, ob der Minimal- und Maximalwert über den Verlauf der Achse, in einem Bereich oder an zwei verschiedenen liegt. Bei der Untersuchung verschiedener Maschinen wurde dieser Zusammenhang deutlich. Die nachfolgenden Abbildungen sollen verschiedene Möglichkeiten zeigen und bewerten.

Liegen die Minimal- und Maximalabweichung in einem Bereich, hat man, wie in Abbildung 6.7 dargestellt, einen großen Kippwinkel am Werkzeuggestisch. Hat man zwei halb so große, voneinander unabhängige, lokal getrennte Abweichungen, in denen immer nur ein Führungswagen fährt, ist der Kippwinkel kleiner.

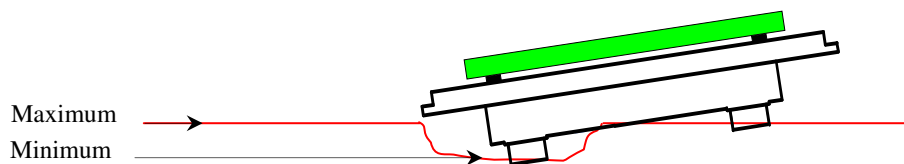


Abbildung 6.7 große Abweichung in einem Bereich

Die Abbildung 6.8 zeigt bei gleicher Abweichung zwei lokal getrennte Extremstellen. Sie werden nur einzeln von den Führungswagen erfasst. Hierbei ergibt sich eine geringere Verkippung des Werkzeuggestisches als beim ersten Fall, auch wenn beide zusammen genommen genauso groß sind.

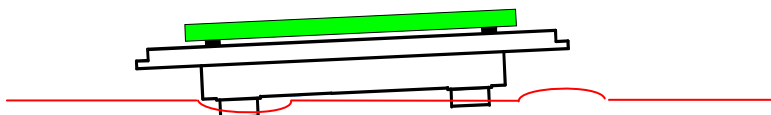


Abbildung 6.8 Minimal- und Maximalabweichung der Führung in zwei voneinander getrennten Bereichen

Praktisch ist es nicht möglich, alle Abweichungen zu beseitigen. Daher sollte immer darauf geachtet werden, dass stärkere und in ihrer Richtung unterschiedliche Abweichungen keinen Einfluss aufeinander haben. Für eine Nacharbeit der Führungsschiene wäre der unter Abbildung 6.8 gezeigte Fall anzustreben.

In der Abbildung 6.9 wird ein letzter Fall dargestellt, Hier liegt der Maximal- und Minimalwert zwar nicht im gleichen Bereich. Doch gehen auch hier beide Extremstellen in die Verkipfung des Maschinentisches ein.

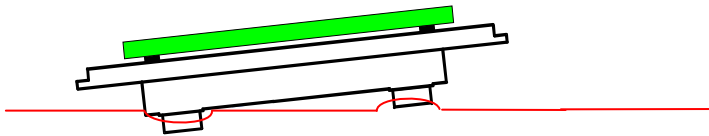


Abbildung 6.9 Minimal- und Maximalabweichung in verschiedenen Bereichen, mit Einfluss aufeinander

Die Formabweichungen der X-Achse gehen direkt auf die Werkstückgeometrie ein und werden im Schlifffbild sichtbar. Liegen Minimal- und Maximalabweichung wie in Abbildung 6.9 zwar in getrennten Bereichen, haben aber dennoch Einfluss aufeinander, kann es vorkommen, dass die Schleifmaschine trotz eingehaltener Toleranz ein schlechtes Schlifffbild liefert. Bei der Nacharbeit sollte besonders auf diese Fälle der Formabweichungen geachtet werden.

6.7 Zusammenfassende Bewertung der Formfehler in Bezug auf die einzelnen Achsen

Durch das Zusammenspiel aller Achsen ergibt sich die Gesamtabweichung der Werkzeugmaschine. Die Untersuchungen an den Schleifmaschinen haben gezeigt, dass nicht jeder Führungsfehler der Achsen gleichermaßen stark in die geometrische Abweichung am Werkstück eingeht.

Die Tabelle 6.1 bewertet qualitativ die Formabweichungen am Werkstück in Bezug auf die einzelnen Achsen.

Tabelle 6.1 Bewertung der Formfehler am Werkstück in Bezug auf die Geradheitsabweichungen der Achsen

Richtung der Geradheitsabweichung	Achse		
	X	Y	Z
X	---	problematisch	unproblematisch ⁹⁸
Y	problematisch	---	problematisch
Z	unproblematisch ⁹⁸	problematisch	---

⁹⁸ unproblematisch, allerdings entsteht ein höherer Verschleiß an Führungswagen.

7 Untersuchung der thermische Einflüsse

Temperaturänderungen sind ein entscheidender Einflussfaktor in Hinsicht auf die Formabweichungen an einer Schleifmaschine. Schaut man sich die über den Tagesverlauf aufgenommenen Messprotokolle einer Achse an, wird deutlich, dass schon geringe Temperaturänderungen große Auswirkungen auf die Führungsbahngenaugigkeit haben. Wird die Hallentemperatur im Winter noch durch Heizkörper stabilisiert, zeigen sich im Sommer sehr große Änderungen in der Hallentemperatur. Temperaturunterschiede von zehn Grad sind im Hochsommer keine Seltenheit und haben einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Untersuchung des Temperatureinflusses am Maschinenbett.

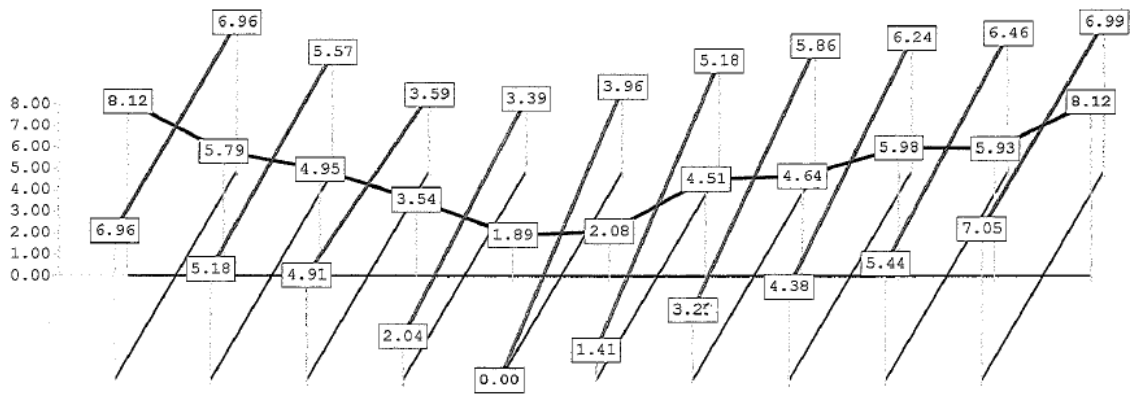


Abbildung 7.1 Geradheitsmessung der X-Achse mit Twist, gemessen um 7:45 Uhr

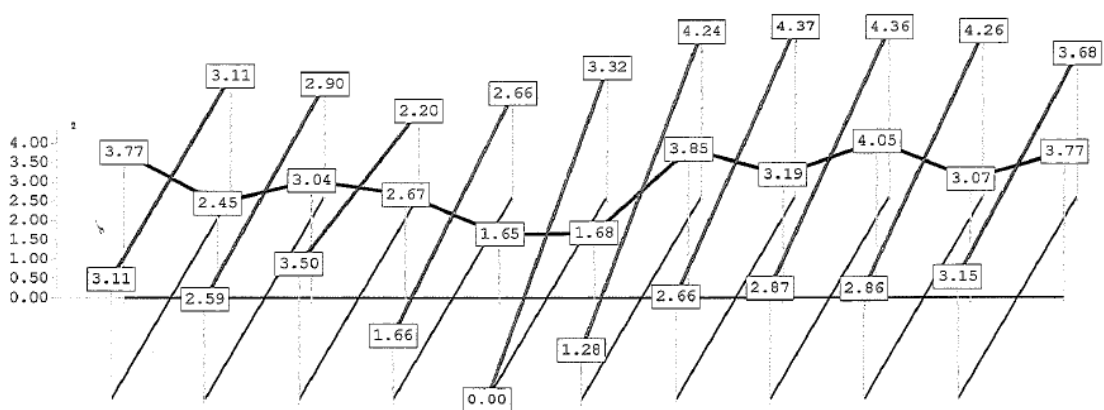


Abbildung 7.2 Geradheitsmessung der X-Achse mit Twist, gemessen um 14:00 Uhr

Die Abbildung 7.1 zeigt eine Geradheitsmessung der X-Achse mit Twist einer PLANOMAT-Schleifmaschine am Morgen um 7:45 Uhr.⁹⁹ Abbildung 7.2 zeigt dieselbe Maschine um 14:00 Uhr. Die Diagramme wurden an einem normalen Sommertag aufgenommen. Weitere Messungen an anderen Tagen bestätigten die Ergebnisse.

Auch, wenn sich die beiden Diagramme auf den ersten Blick nicht von der Form unterscheiden, sind doch die Änderungen der Werte sehr deutlich. An den Randpunkten zeigt sich eine Veränderung des Messwertes von über 4 μm . Dieser Wert ist durchaus bedenkenswert, da die Vorgabe der maximalen Toleranz bei 4 μm liegt. Schon diese beiden Messdiagramme zeigen, dass eine Messung und eine erfolgreiche Nacharbeit der Führungsschienen bei stärkeren Temperaturschwankungen nicht möglich ist.

7.1 Thermodynamische Faktoren

Um die thermodynamischen Abläufe innerhalb der Schleifmaschine und der Montagehalle näher erläutern zu können, soll an dieser Stelle auf ein paar theoretische Grundlagen eingegangen werden.

Als erstes stellt sich die Frage, was Wärme¹⁰⁰ eigentlich ist. Nach der Thermodynamik ist Wärme eine Prozessgröße¹⁰¹, die nach dem zweiten Hauptsatz, immer von einem System höherer Temperatur, an ein System niedrigerer Temperatur übertragen wird. Solange eine Temperaturdifferenz zwischen zwei gekoppelten Systemen besteht, wird auch immer eine Übertragung von Wärme zwischen diesen beiden stattfinden.

7.1.1 Wärmedehnung

Ein langgestreckter Körper, der eine Temperaturänderung ΔT erfährt und einen Temperaturexpansionskoeffizienten ungleich Null hat, erfährt eine Längenänderung. Ein Volumenkörper, der eine Temperaturdifferenz ΔT erfährt, erfährt eine Ausdehnung in alle Richtungen.

⁹⁹ Vergleiche Kapitel 3.1 Elektronische Neigungswaage auf Seite 25.

¹⁰⁰ Weiterführende Definition des Begriffs Wärme im Glossar unter auf Seite 149.

¹⁰¹ Prof. Dr. Weigand, Bernhard; Prof. Dr. Köhler, Prof. Dr. Jürgen; von Wolfersdorf, Jens: Thermodynamik kompakt; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. Seite 177.

Ausgehend von der Länge, ergibt sich folgender Zusammenhang¹⁰².

$$\Delta l = l_0 \alpha_T \Delta T \quad (7.1)$$

Die Längenänderung Δl ergibt sich aus dem Produkt des Längenausdehnungskoeffizienten α_T , der Ausgangslänge l_0 und der Temperaturdifferenz ΔT . Im Bereich der Raumtemperatur kann α_T als konstanten Faktor angenommen werden.

Bei den betrachteten Linearführungen kommen lediglich zwei Werkstoffe zum Einsatz. Stahl bei den Führungen und Grauguss (GG25) beim Maschinenbett. Die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten sind hier¹⁰³:

$$\text{GG25} : \alpha_T = 1,0 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$$

$$\text{Stahl} : \alpha_T = 1,1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$$

Bedingt durch die unterschiedlichen Koeffizienten, ergibt sich beim Stahl eine um 10% höhere Längendehnung. Auf eine angenommene Länge der Linearführung von $l_0=2575$ mm und einer Temperaturänderung von $\Delta T=10K$, ergeben sich demnach thermische Längendehnungen von:

$$\Delta l_{\text{Stahl}} = 0,2833 \text{ mm für die Führungsschienen}$$

$$\Delta l_{\text{GG}} = \Delta l_{\text{Stahl}} \cdot 0,9091 = 0,2575 \text{ mm für das Maschinenbett}$$

Die daraus resultierende Differenz von 0,0258 mm wird sich in Form von Verspannungen niederschlagen. Da der Querschnitt der Führungsschiene gegenüber dem großen Querschnitt des Maschinenbettes sehr klein ist, kann angenommen werden, dass die

¹⁰² Nach Prof. Dr. Mayr, Martin: Technische Mechanik: Statik- Kinematik- Kinetik- Schwingungen- Festigkeitslehre, Carl Hanser Verlag München Wien 2008, Seite 269.

¹⁰³ Nach Prof. Dr. Mayr, Martin: Technische Mechanik: Statik- Kinematik- Kinetik- Schwingungen- Festigkeitslehre; Carl Hanser Verlag München Wien 2008, Seite 269.

entstehenden Verspannungskräfte hauptsächlich zu einer Dehnung oder Stauchung der Führungsschiene führen werden¹⁰⁴.

7.1.2 Wärmeleitfähigkeit

„Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Stoffeigenschaft, die angibt welcher Wärmestrom pro Längeneinheit des Materials in Richtung des Wärmestroms und pro Grad Temperaturdifferenz übertragen werden kann.“¹⁰⁵

Die Einheit der Wärmeleitfähigkeit λ ist $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Die Wärmeleitfähigkeit von Grauguss, der in unserem Fall den Großteil der Schleifmaschine ausmacht, liegt bei $54 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die von Stahl zwischen 14 bis $52 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.¹⁰⁶ Diese Werte sind im Vergleich zu anderen Werkstoffen, wie zum Beispiel Polymerbeton ($1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), sehr hoch.

7.1.3 Wärmefluss

Verfügen zwei gekoppelte Systeme über eine Temperaturdifferenz, kommt es zu einem Wärmefluss. Der Wärmefluss oder auch Wärmestrom genannt, erfolgt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Er dient der quantitativen Beschreibung des Wärmeübertragungsvorganges.¹⁰⁷

Definiert ist der Wärmefluss \dot{Q} als Wärmemenge δQ übertragen in der Zeit δt . Da es sich hierbei um eine Leistung handelt ist die Einheit Watt.

¹⁰⁴ Dipl. Ing. Kabus, Karlheinz: Mechanik und Festigkeitslehre; Hanser Verlag München, S209-12.

¹⁰⁵ Prof. Dr. Böckh, Peter, Prof. Dr. Wetzel, Thomas: Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009, Seite 11.

¹⁰⁶ Prof. Dr. Hirsch, Andreas: Werkzeugmaschinen: Grundlagen : Lehr- und Übungsbuch; Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 2000, Seite 66.

¹⁰⁷ Prof. Dr. Marek, Rudi, Prof. Dr. Nitsche, Klaus: Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen, Anwendungen, Übungsaufgaben; Carl Hanser Verlag München, 2007, Seite 16.

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} \quad (7.2)$$

Der Wärmefluss zwischen zwei gekoppelten Systemen ist umso größer, je kürzer die Übertragungszeit ist, beziehungsweise umso größer die übertragene Wärmemenge ist. Der für die Formänderung verantwortliche Wärmefluss findet zwischen dem Maschinenbett und der Umgebungsluft statt.

Mit der in Kapitel 7.1.4 beschriebenen Wärmeleitfähigkeit λ ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{l} \Delta T \quad (7.3)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} ist das Produkt zwischen der Wärmeleitfähigkeit λ , der Übertragungsfläche A , Temperaturdifferenz ΔT und dem Kehrwert der Übertragungslänge l .

7.1.4 Spezifische Wärmekapazität

Verschiedene Körper können bei gleicher Temperaturänderung, umso mehr Wärme aufnehmen je größer ihre Wärmekapazität ist. Die dem Stoff entsprechende spezifische Wärmekapazität c gibt an, wieviel Wärme diesem zugeführt werden muss, um dessen Temperatur ΔT um 1K zu erhöhen.¹⁰⁸

$$c = \frac{\delta Q}{m \Delta T} \quad [\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}] \quad (7.4)$$

¹⁰⁸ Prof. Dr. Knoche, K. F.; Bošnjaković, Fran: Technische Thermodynamik, Teil 1; Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, GmbH & Co. KG Darmstadt 1998, Seite 47f.

Für die Werkzeugmaschinen ist es oft von Vorteil, wenn die Wärmekapazität gering ist, damit sich ein thermischer Ausgleich der Maschine schneller einstellt. Ein Werkstoff mit geringer spezifischer Wärmekapazität sollte daher bevorzugt werden.

Die Tabelle 7.1 gibt die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten für verschiedene Stoffe an.

Tabelle 7.1 Mittlere spezifische Wärmekapazitäten c_m ¹⁰⁹

Material	Mittlere spezifische Wärmekapazitäten c_m in $\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Beton:	1005
Gusseisen	544
Luft	1,005 (bei 101.325 Pa, 273,15°K)
Stahl	461

7.1.5 Wärmeübertragung

Laut dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik¹¹⁰, dem Energieerhaltungssatz, ist in einem abgeschlossenen System die Energie konstant und kann niemals aus dem Nichts entstehen und nicht vernichtet werden. Daher kann diese nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden, in einem Körper enthalten sein oder von dem einen auf den anderen übertragen werden.¹¹¹

Die Zustandsgröße thermische Energie E_{th} [Nm, J] setzt sich aus der absoluten Temperatur T [K] eines Körpers, seiner Masse m [kg] und der spezifischen Wärmekapazität c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] zusammen.

¹⁰⁹ Prof. Dr. Böge, Alfred: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik; Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2011, Seite F10.

¹¹⁰ Siehe im Glossar unter A2.8 Hauptsatz der Thermodynamik (1.) auf Seite 145.

¹¹¹ Prof. Dr. Windisch: Thermodynamik: Ein Lehrbuch für Ingenieure; Oldenburg Wissenschaftsverlag, München, 2008.

$$E_{th} = cmT \quad (7.5)$$

Für thermische Einflüsse unter gleichbleibendem Druck gilt für die Wärmeübertragung die Formel:

$$\delta Q = cm\Delta T \quad (7.6)$$

Die übertragene Wärmemenge δQ ist das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität c , der Masse m und der Temperaturdifferenz ΔT . Im nachfolgenden Teil dieser Arbeit wird sich zeigen, dass die Maschinenbetten relativ großen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Diese resultiert überwiegend aus der veränderlichen Außentemperatur und der damit verbundenen, zeitlich verzögert, folgenden Hallentemperatur. Gleiches gilt für thermische Einflüsse innerhalb der Halle, wie Zugluft durch offene Türen und der Trägheit der Temperaturanpassung des Maschinenbettes.

7.2 Einfluss von Temperaturänderungen auf die Maschine

Bedingt durch die Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit erklärt sich, dass eine Temperaturänderung der Umgebung immer eine zeitlich verzögerte Änderung der Temperatur an der Werkzeugmaschine zur Folge hat. Dieser Zusammenhang wird auf den nachfolgenden Seiten durch die Messungen bestätigt (vgl. Abbildung 7.8).

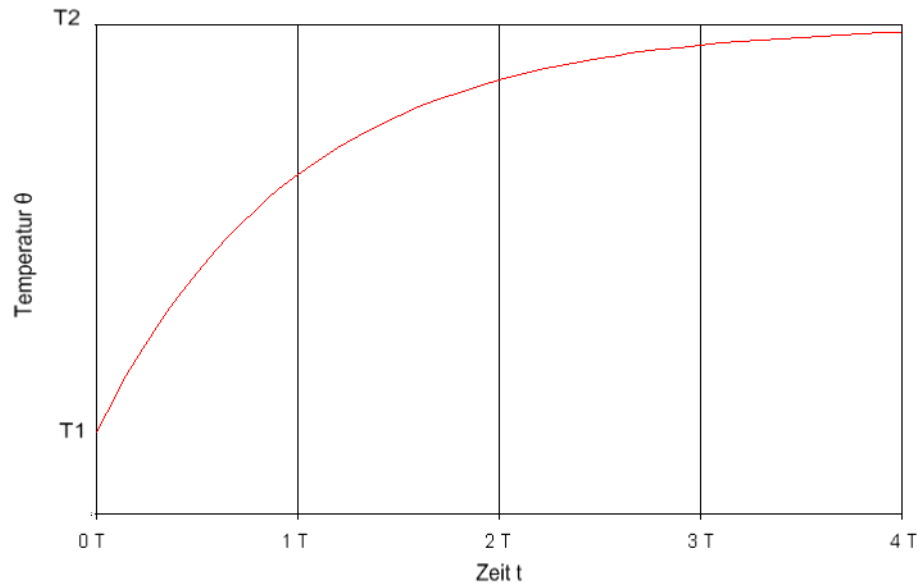


Abbildung 7.3 Temperaturverlauf als Funktion der Zeit bei Erwärmung eines idealen thermischen Systems (qualitativ)

Die Abbildung 7.3 zeigt den thermischen Verlauf als Funktion der Zeit bei Erwärmung eines idealen thermischen Systems. Die zugeführte Wärmemenge entspricht hierbei der gespeicherten Wärmemenge, addiert mit der abgegebenen. Als Formel ausgedrückt ergibt sich die Gleichung¹¹²:

$$\phi \cdot dt = c \cdot d\theta + \frac{1}{R} \cdot (\theta - \theta_R) \cdot dt \quad (7.7)$$

Hierbei sind:

ϕ : zugeführter Wärmestrom

C : Wärmekapazität

θ : Temperatur an der Maschine

θ_R : Umgebungstemperatur

R : Wärmeübergangswiderstand von System an Umwelt

¹¹² Prof. Dr. Perović, Božina: Bauarten spanender Werkzeugmaschinen; Expertverlag Renningen, 2002, Seite 13f.

Um eine bessere Unterscheidung zur nachfolgenden Zeitkonstante T zu gewährleisten, wurde θ für Temperatur gewählt.

Die zeitliche Änderung des Wärmestroms ist im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen der Maschinen- und der Umgebungstemperatur abhängig.

Durch Umstellen folgt:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{Rc} = \frac{\theta}{c} + \frac{1}{RC} \cdot \theta_R$$

Die Randbedingungen der Differentialgleichung lauten in diesem Fall:

- Anfangstemperatur bei $t_0=0$ soll $\theta = \theta_0$
- Bei $t_\infty = \infty$ soll die Temperatur den Wert $\theta = \theta_1$ annehmen.
- Der Temperaturunterschied $\Delta\theta$ ist definiert als: $\Delta\theta = \theta - \theta_0$

Mit den Randbedingungen folgt nun die Gleichung der Temperatur θ als Funktion der Zeit t .¹¹³

$$\theta = \Delta\theta_B \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (7.8)$$

Aus diesen Zusammenhängen folgt für die Praxis, dass bei nicht konstanter Umgebungstemperatur immer mit Temperaturunterschieden an einer Maschine zu rechnen ist. Eine thermisch ausgeglichene Maschine ist nur bei einer konstanten Raumtemperatur möglich.

Der Zusammenhang zwischen dem Einfluss der Halltemperatur und der Maschine hat Einfluss auf ihre Gestalt. Durch die in Kapitel 7.1.1 beschriebene Wärmedehnung,

¹¹³ Prof. Dr. Perović, Božina: Bauarten spanender Werkzeugmaschinen; Expertverlag Renningen, 2002, Seite 13f.

kommt es über den Tagesverlauf, zu sich zeitlich ändernden Verformungen an der Schleifmaschine. Der Grund dafür sind unterschiedliche Wärmezonen im Maschinenbett.

Die Abbildung 7.4 zeigt gemessene Temperaturdifferenzen an dem Bett einer PLA-NOMAT Schleifmaschine. Die Messungen wurden am frühen Morgen durchgeführt, in einer Phase in der die Umgebungstemperatur θ_R höher war als die Maschinebetttemperatur θ . Der Farbverlauf zeigt die Temperaturbereiche.

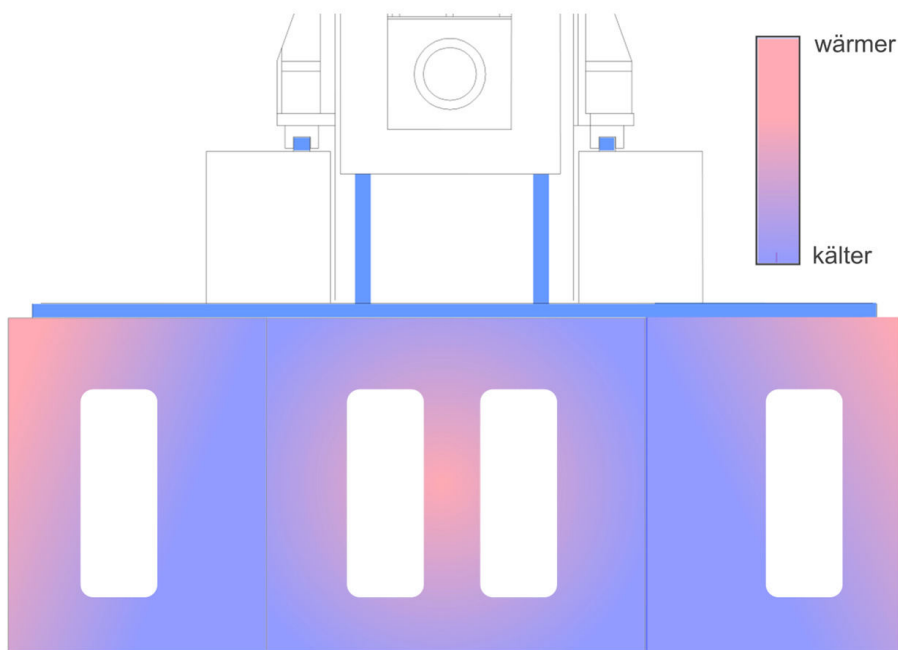


Abbildung 7.4 Schematische Darstellung der Temperaturunterschiede am Maschinenbett (morgens)

Die Temperaturunterschiede lassen sich so erklären, dass die Bereiche höherer Masse mehr Wärme speichern können. Kommt es zu einer Erhöhung der Umgebungstemperatur θ_R , erwärmen sich erst die Randbereiche. Mittels Wärmeübertragung,¹¹⁴ wird die Energie ins Innere geleitet¹¹⁵. An den Stellen, die mehr Guss aufweisen, sind diese während der Aufheizphase (morgens) deutlich kälter, da diese mehr Wärme aus der Umgebungsluft absorbieren können. Durch die teilweise geschlossene Bauweise kommt es

¹¹⁴ Vergleiche Kapitel 7.1.5 auf Seite 99.

¹¹⁵ Vergleiche Kapitel 7.1.2 auf Seite 97.

nur bedingt zu einem Austausch mit der Umgebungsluft, so hat die Luft im Inneren eine geringfügig niedrigere Temperatur als die Außenluft.

Durch die gemessenen Temperaturunterschiede kommt es zu einer inhomogenen Längenänderung im Guss. Die Bereiche mit höheren Temperaturen dehnen sich dabei stärker als die Bereiche mit niedrigeren.

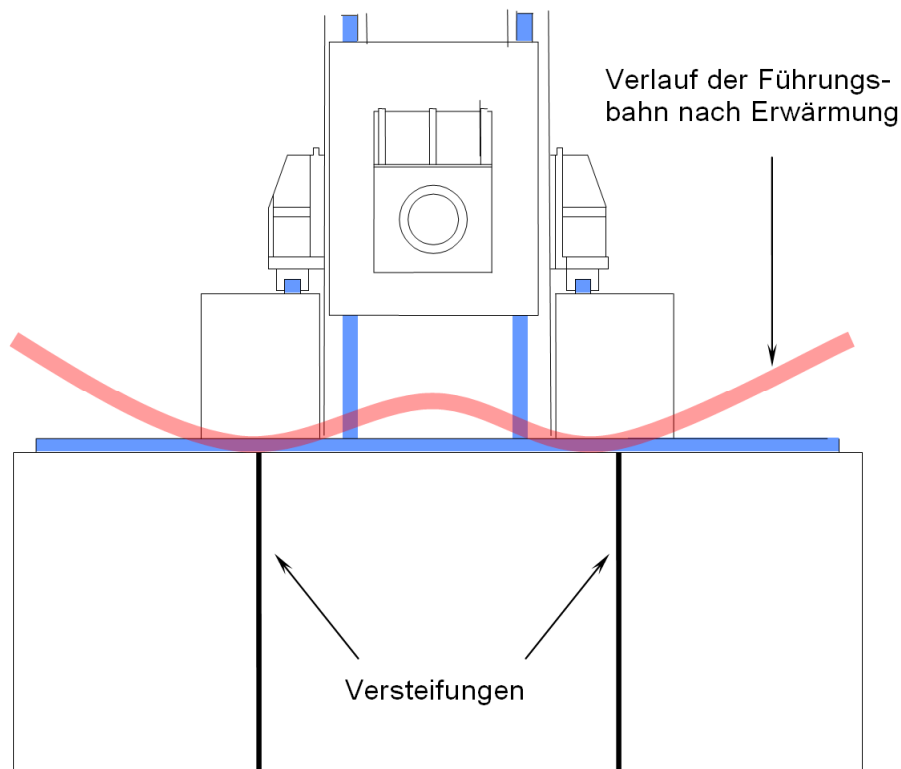


Abbildung 7.5 Prinzipielle Formänderung durch Temperaturerhöhung

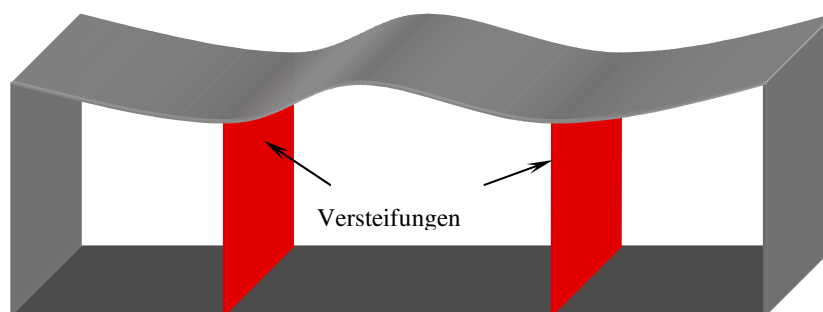


Abbildung 7.6 Prinzip Darstellung eines thermisch verformten Maschinenbettes einer PLANOMAT-Schleifmaschine bei Temperaturerhöhung

Die Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 zeigen die Formänderung an einer PLANOMAT Schleifmaschine bei Temperaturzunahme. Die Form des dargestellten Verlaufs stammt aus den Ergebnissen der Messungen an Maschinenbetten unter Aufzeichnung der Temperaturänderung. Die rot dargestellte Linie (Abbildung 7.5) zeigt qualitativ den Verlauf der Führung bei steigender Temperatur. Hier zeigt sich deutlich, dass sich die Randbereiche des Maschinenbettes stärker ausdehnen als der Mittelteil. Dieser Zusammenhang wurde durch zahlreiche Messungen bestätigt. Die Form der Ausdehnung gleicht dem Buchstaben W. Das kommt daher, dass unter den beiden tiefsten Punkten Versteifungen liegen, die sich nicht so stark dehnen wie die Außenseiten, da der innere Bereich einen geringeren Wärmefluss durch die Umgebungsluft erfährt. Daher kommt es hier zu einer langsameren Erwärmung. Als besonders problematisch haben sich Schleifmaschinen mit sehr langen X-Achsen herausgestellt. Gerade bei diesen zeigten sich die deutlichsten Abweichungen in der Ebenheit.

7.3 Erläuterung der Temperaturmessungen

Die Temperatur des Maschinenbettes hat einen wesentlichen Einfluss auf die geometrische Form. Um diese zu quantifizieren, wurden an verschiedenen Stellen am Maschinenbett und in der Halle Temperaturmessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten in regelmäßigen Abständen über mehrere Tage. So kann durch die Einzelmessungen auf den Temperaturverlauf der einzelnen Messpunkte geschlossen werden.

Verwendete Messgeräte

Als Messgeräte kamen ein Testo 175 Zweikanaldatenlogger¹¹⁶, und ein manuell abzulesendes Zweikanalmessgerät zum Einsatz. Als Messfühler dienten Sensoren des Typs K¹¹⁷, die jeweils über eine Vorrichtung zum Verschrauben mit dem Maschinenbett verfügen.

¹¹⁶ Siehe im Glossar unter A2.21 Temperaturdatenlogger auf Seite 149.

¹¹⁷ Siehe im Glossar unter A2.22 Temperaturfühler Typ K auf Seite 149.

Die verwendeten Temperaturfühler wurden im Vorwege überprüft, um einen systematischen Messfehler¹¹⁸ auszuschließen. Hierbei wurden alle Fühler (10 Stück) miteinander an einem Körper verschraubt. Nach etwa zehn Minuten wurde an den beiden Messgeräten die Temperatur abgelesen und verglichen. Es konnte keine Abweichung der Messwerte zueinander festgestellt werden. Die Anzeigegenauigkeit der Geräte beträgt 0,1K. Sowohl die beiden Temperaturmessgeräte, als auch die verwendeten Temperaturfühler, verfügten über aktuelle Kalibrierprotokolle.

Wahl der Messstellen

Um eine möglichst genaue Aussage über die thermische Verformung des Maschinenbettes treffen zu können, wurden die Messfühler des Temperaturmessgerätes an Punkten gemäß Abbildung 7.7 des Bettes geschraubt und gegen Zugluft mit Zellstoff isoliert.

Auch, wenn die beiden Führungsbahnen symmetrisch erscheinen, zeigt sich dennoch, dass Messpunkt 2 und Messpunkt 4 deutliche Temperaturdifferenzen aufweisen. Dies resultiert unter anderem aus dem Einfluss des Maschinenständers und der Y-/Z-Achse, die entweder Temperatur emittieren oder absorbieren können. (Vgl. Kap. 7.1.5 und 7.1.3)

¹¹⁸ Siehe im Glossar unter A2.20 Systematischer Fehler auf Seite 148.

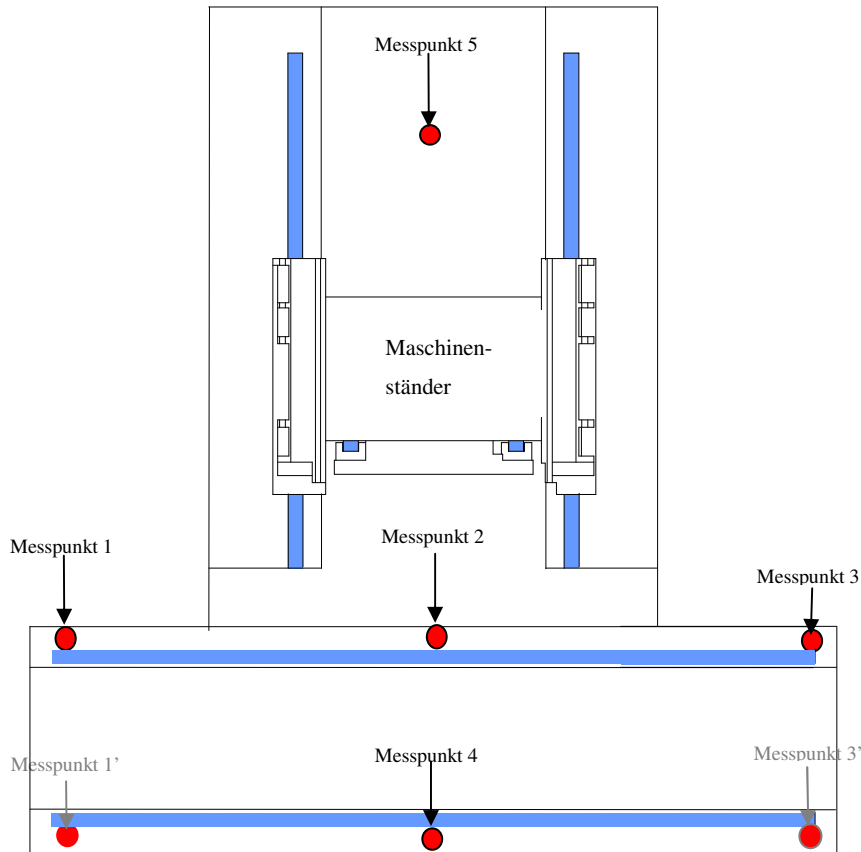


Abbildung 7.7 Wahl der Messpunkte, Draufsicht

Die Abbildung 7.7 zeigt die Draufsicht auf die X-Achse. Diese ist die längste Achse und hat sich im Montageprozess als besonders problematisch herausgestellt. Also wurden an dieser die meisten Fühler installiert. Messpunkt 1 und Messpunkt 3 sind spiegelsymmetrisch zur Mitte des Maschinenbettes. Allerdings hat sich gezeigt, dass diese Punkte durchaus andere Temperaturen hatten. Dies lag nicht zuletzt daran, dass äußere Einflüsse, wie Kalt- und Warmluftströmungen vorhanden waren.

An den Messpunkt 1' und Messpunkt 1' hingegen zeigten sich keine messbaren Unterschiede. Daher wurde im weiteren Verlauf auf diese Fühler verzichtet. Da der Maschinenständer (Messpunkt 5) relativ weit von diesen Messpunkten entfernt liegt, ist auch der Wärmefluss in diese Richtung geringer als beispielweise bei Messpunkt 2 und 4. Dieser praktische Zusammenhang wird auch durch die Theorie der Thermodynamik bestätigt. Die Formel (7.3) verdeutlicht hierbei den Längeneinfluss, der als Produkt des Kehrwertes eingeht. Der Abstand zum Ständer ist hier relativ groß, ebenso die Strecken zwischen dem Ständer und den Messpunkten 1 und 1'. Das Maschinenbett hat an diesen Punkten genügend Zeit den Wärmeeinfluss des Ständers über die Wärmeübertragung an die Umgebungsluft auszugleichen.

Die deutlichsten Unterschiede wurden zwischen den Messpunkten 1 und 2 ermittelt, beziehungsweise auf Grund der Spiegelsymmetrie ebenso zwischen 2 und 3.

Um die Dehnung des Maschinenbettes in Y-Richtung abschätzen zu können, wurden Temperaturfühler im gleichen Abstand, in verschiedenen Höhen angebracht. Die übrigen Bereiche wurden mit Hilfe eines Handmessgerätes über eine Kontaktsonde gemessen, und die Werte in eine Zeichnung eingetragen.

7.4 Korrelation zwischen der Hallen- und der Maschinenbetttemperatur

Um eine Aussage über den Temperatureinfluss zwischen der Hallentemperatur und der Temperatur am Maschinenbett treffen zu können, wurde ein Temperaturfühler an Messpunkt 4¹¹⁹ installiert. Messpunkt 4¹¹⁹ liegt in der Mitte der X-Achse und ist in der Nähe des Maschinenständers.

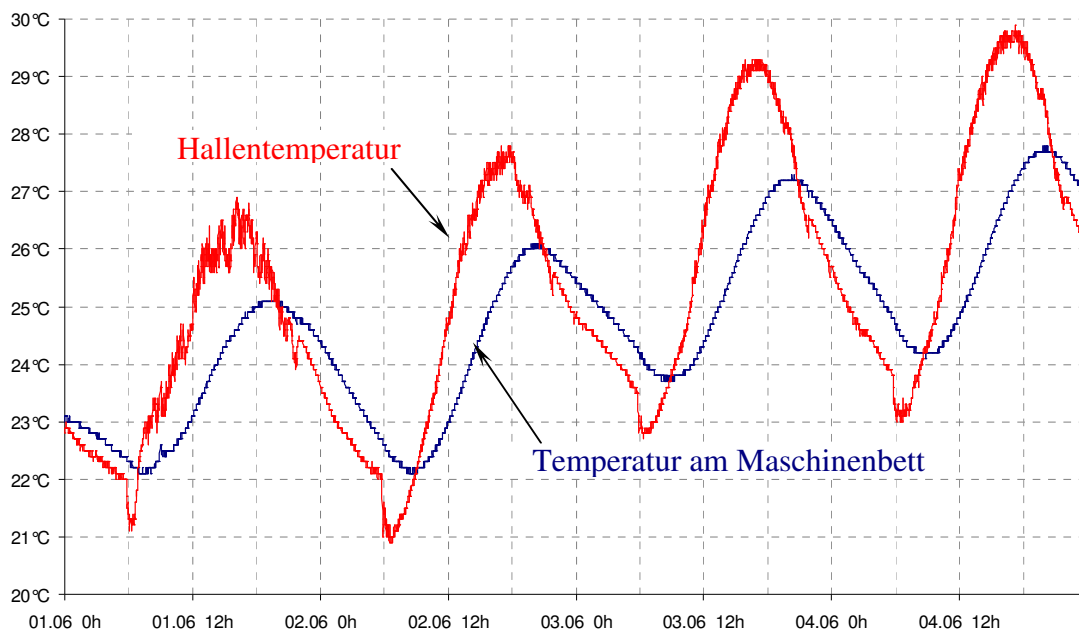


Abbildung 7.8 zeitlicher Verlauf der Temperaturen

Die Abbildung 7.8 zeigt den zeitlichen Verlauf zwischen der Hallentemperatur (rote Kurve) und der Temperatur des Maschinenbettes (blaue Kurve). Deutlich zu erkennen

¹¹⁹ Vergleiche Abbildung 7.7.

folgt die Temperatur des Maschinenbettes der Hallentemperatur. Eine Änderung der Hallentemperatur, tritt mit einer Zeitdifferenz von etwa 3 Stunden versetzt beim Maschinenbett auf. Das Maschinenbett reagiert somit relativ träge auf Temperaturänderungen. Der leicht fluktuierende Verlauf des Temperaturgraphen hängt mit weiteren Umgebungseinflüssen zusammen. Das Maschinenbett gleicht diese durch seine Wärmekapazität und den Wärmewiderstand aus.

7.5 Einflüsse auf die Hallentemperatur

Die Hallentemperatur wird durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Um hierbei die entscheidendsten zu bestimmen, wurde die Halle mit Hilfe eines Temperaturmessgerätes für Lufttemperaturmessungen aufgenommen und kartographiert. Im ersten Schritt wurden thermische Einflüsse durch lokale Temperaturdifferenzen innerhalb der Halle aufgenommen. Das nachfolgende Modell soll den Zusammenhang veranschaulichen.

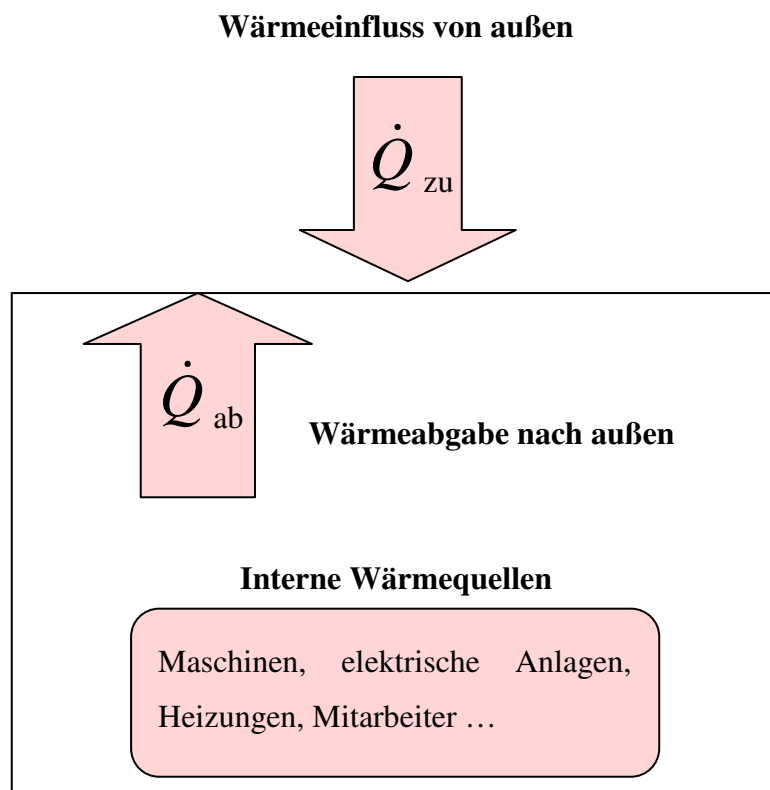


Abbildung 7.9 Modell der Temperatureinflüsse in der Montagehalle

Die Hallentemperatur wird, wie in Abbildung 7.9 dargestellt, durch drei maßgebliche Wärmeflüsse bestimmt. Dieses sind Wärmeflüsse von außen nach innen (Q_{zu}), von in-

nen nach außen (Q_{ab})¹²⁰, sowie interne Wärmequellen¹²¹, wie die Heizung im Winter, der Maschinen und elektrischen Anlagen und der Mitarbeiter.

Innerhalb der Montagehalle standen zwei Maschinen, eine Waldrich-Coburg Führungsbahnschleifmaschine und eine PLANOMAT Schleifmaschine. An der Waldrich-Coburg Führungsbahnschleifmaschine werden die Flächen der Linearführungen der Maschinenbetten und Ständer geschliffen. Da die PLANOMAT-Schleifmaschine während des Untersuchungszeitraumes nicht lief, hatte sie keinen Einfluss. Die Waldrich-Coburg Führungsbahnschleifmaschine hat aber wie gezeigt wurde einen großen Einfluss auf die Raumtemperatur¹²².

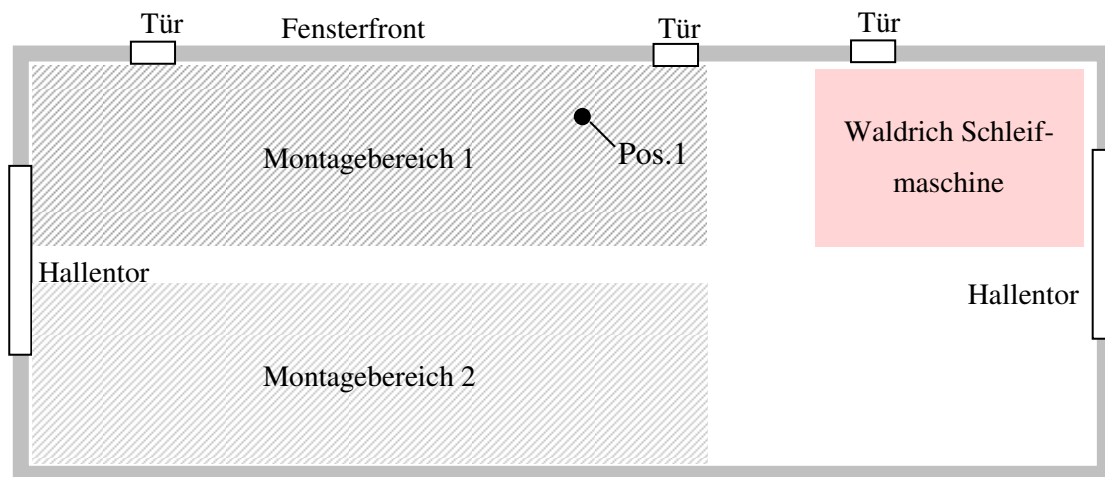


Abbildung 7.10 schematische Aufteilung der Montagehalle 14

Abbildung 7.10 zeigt schematisch den Aufbau der Montagehalle 14. Während der Temperaturentnahmen wurde hauptsächlich im Montagebereich 1 gemessen, der durch die Fensterfront und die Türen thermisch beeinflusst wurde. Als weitere markante Punkte stellten sich die Führungsbahnschleifmaschine, als auch die Hallentore und Türen heraus. An der Schleifmaschine wurde mit einem Luftthermometer, eine leichte Temperaturerhöhung gemessen. Bei den Hallentoren, und vor allem an den Türen, war der Temperaturunterschied dagegen gravierend, und je nach Außentemperatur, stark unter-

¹²⁰ Vergleiche Kapitel 7.1.3 Wärmefluss auf Seite 97.

¹²¹ Vergleiche Kapitel 7.5 Einflüsse auf die Hallentemperatur auf Seite 109.

¹²² Vergleiche hierzu auch Tabelle 7.2.

schiedlich zur Hallentemperatur. Eine offene Hallentür bewirkte einen deutlichen Temperaturunterschied innerhalb des Maschinenbettes, der bei einer Langzeitmessung ermittelt wurde. Die Ebenheit der X-Achse schwankte zwischen den Messungen deutlich. Eine Differenz von vier Mikrometern ist keine Seltenheit.¹²³

Die Temperaturschwankungen im Maschinenbett ergeben sich durch verschiedene Faktoren. Zum Einen ändert sich die Raumtemperatur durch die Änderung der Außentemperatur und damit zeitversetzt die Maschinenbetttemperatur. Dazu kommen interne Einflussfaktoren. Arbeitende Werkzeugmaschinen, das Öffnen und Schließen der Hallentore, elektrische Verbraucher wie Leuchtstofflampen, Strahlung der Sonne, Körperwärme der Mitarbeiter und Materialtransporte in der Halle.

Tabelle 7.2 halleninterne thermische Einflüsse

Einflussfaktoren	Anzahl (ca.)	Wärmeabgabe in Watt (ca.)	Durchschnittliche Wärmeabgabe in Watt (ca.)	Gesamte Wärmeabgabe In Watt (ca.)
Beleuchtung ¹²⁴	478	58	40 (~70% ¹²⁵)	20000
Waldrich-Coburg	1	3000-60000	6000	6000
Weitere Werkzeugmaschinen	1	2000-18000	3000	3000
Mitarbeiter ¹²⁶	4-10	150-400	250	1500
Messmittel & Computer	2	150-450	300	600

¹²³ Vergleiche hierzu auch Kapitel 7.

¹²⁴ Siehe im Glossar unter A2.6 Gestellbauformen auf Seite 144.

¹²⁵ Regelung des Stromes zur Lichtanpassung (30-100%)

¹²⁶ Siehe im Glossar unter A2.25 Wärmeabgabe eines Menschen auf Seite 150.

7.5.1 Einfluss der Außentemperatur auf die Hallentemperatur

Betrachtet man den beispielhaften Temperaturverlauf der Raumtemperatur in Abbildung 7.11, fällt auf, dass dieser um sechs Uhr einen Sturz um etwa einen Grad erfährt. Zu dieser Zeit kommen die Mitarbeiter zur Arbeit und öffnen die Hallentür. Morgens ist die Außentemperatur noch deutlich geringer als die Hallentemperatur, daher kommt es zu einem kurzzeitigen Temperatursturz in unmittelbarer Nähe der Tür.

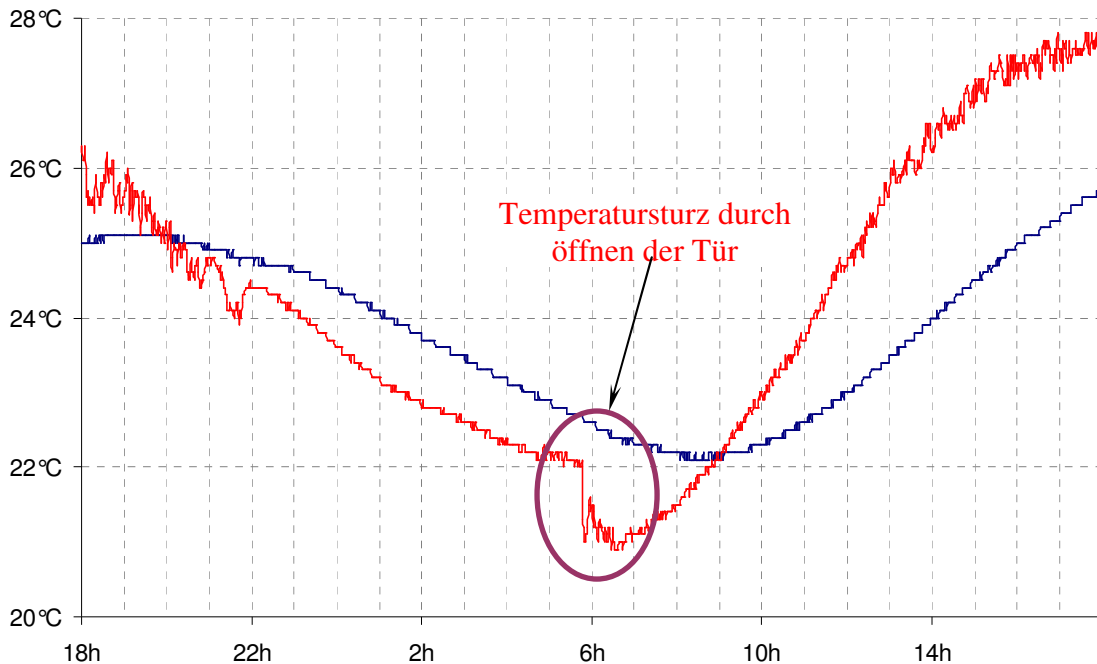


Abbildung 7.11 Einfluss einer geöffneten Tür Pos. 1 in Abbildung 7.10
(Temperaturverlauf vom 2.06.11)

Um die Schwankungen der Hallentemperatur erklären zu können, werden Temperaturdaten der Außentemperatur benötigt. In unmittelbarer Nähe der Montagehalle befindet sich eine Wetterstation¹²⁷. Deren Wetterdaten dieser werden als Vergleichstemperatur zu den Messungen in der Montagehalle genommen. Abbildung 7.12 zeigt den Einfluss der Außentemperatur auf die Hallentemperatur.

Zwischen der Montagehalle und der Umgebung bestand morgens ein Temperaturunterschied von mehr als zehn Kelvin.

¹²⁷ Wetterstation Bergedorf, Lohbrügger Kirchstraße 65, Website: www.wettersstation.com, Betreiber: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik

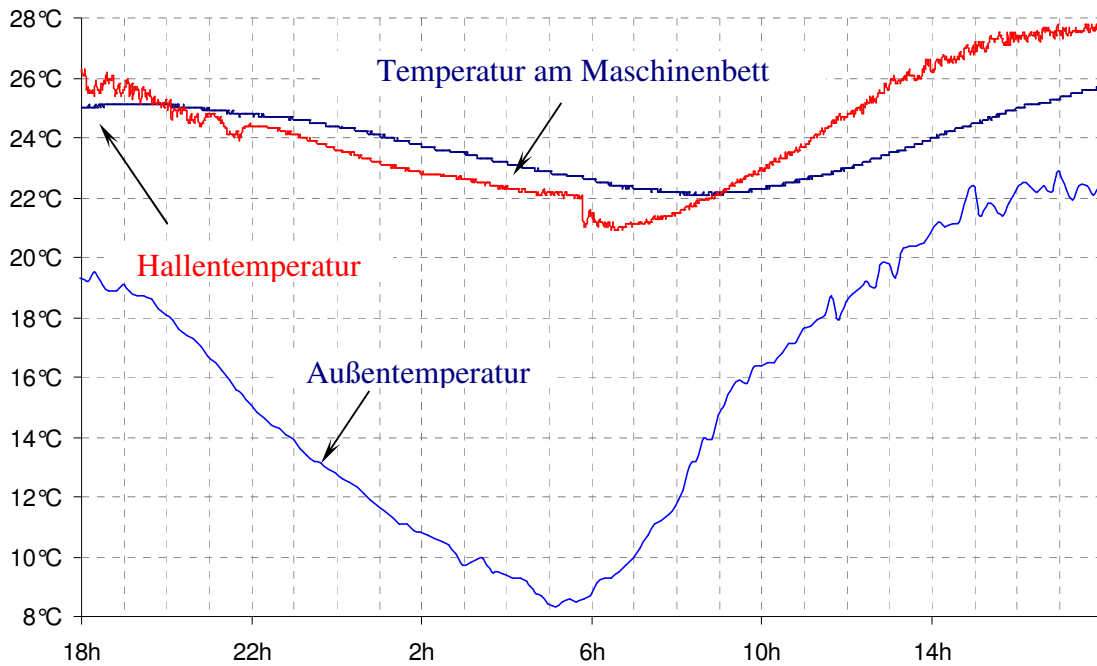


Abbildung 7.12 Einfluss der Außentemperatur (2.06.11)

Die Außentemperatur beeinflusst die Hallentemperatur, die wiederum die des Maschinenbettes beeinflusst. Die Außentemperatur ist somit ein Einflussfaktor auf die geometrische Form des Maschinenbettes und damit auf den Produktionsprozess.

Betrachtet man den Zeitraum einer ganzen Woche, wird dieser Zusammenhang gemäß Abbildung 7.13 noch deutlicher. Die Messwerte stammen aus dem Zeitraum vom 7.06.2011 bis 14.06.2011. Vom 11.06. bis 13.06. (Pfingstfeiertage) wurde in der Montagehalle nicht gearbeitet. Das schließt äußere Einflüsse wie das Öffnen von Türen, Türen oder Fenstern als Störgröße aus. Ebenso sind Einflüsse der Maschinen und Personen innerhalb der Halle auszuschließen.

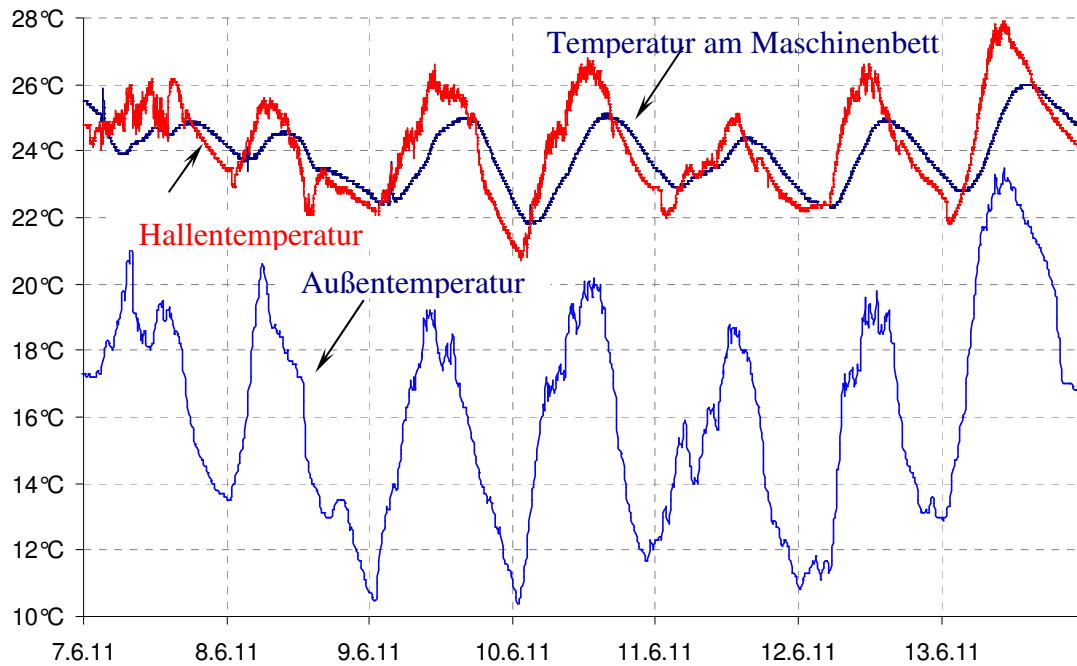


Abbildung 7.13 Temperaturverlauf einer gesamten Woche

Auch hier zeigt sich die Abhängigkeit der Hallentemperatur von der Außentemperatur. Selbst kleine Änderungen der Außentemperatur spiegeln sich im Verlauf der Hallentemperatur wider. Sind noch im linken Teil des Diagramme noch Einflüsse, wie das Öffnen von Türen, oder die Wärmeabgabe von Maschinen und Personen innerhalb der Halle zu sehen, folgt der Graph der Hallentemperatur während des Pfingstwochenendes immer streng der Außentemperatur. In diesem Zeitraum waren Fenster und Türen geschlossen.

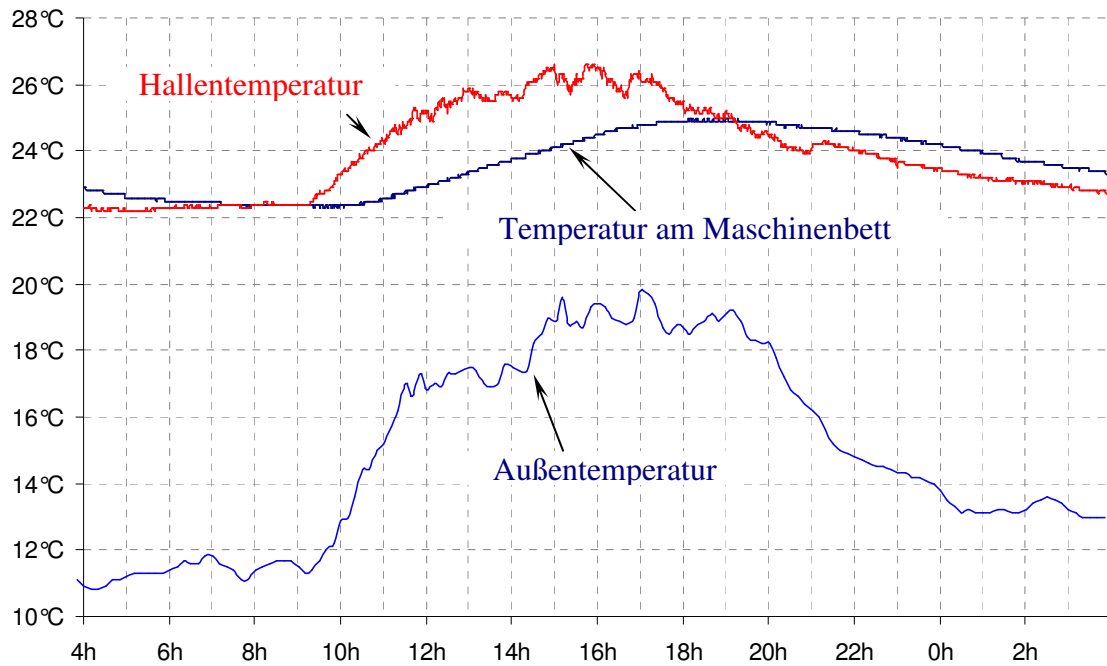


Abbildung 7.14 Temperaturverlauf an einem arbeitsfreien Tag (12.06.2011 Pfingstsonntag)

Die Abbildung 7.14 zeigt den Temperaturverlauf eines arbeitsfreien Tages in vergrößerter Form. Selbst kleinste Schwankungen der Außentemperatur um weniger als ein Grad, finden sich im Verlauf der Hallentemperatur wieder.

Zu beachten ist allerdings, dass die Wetterstation Bergedorf nicht in unmittelbarer Nähe (ca. 2-3km) der Montagehalle liegt. Sie erfasst somit nicht exakt die Hallentemperatur, kann aber zur vergleichenden Betrachtung herangezogen werden.

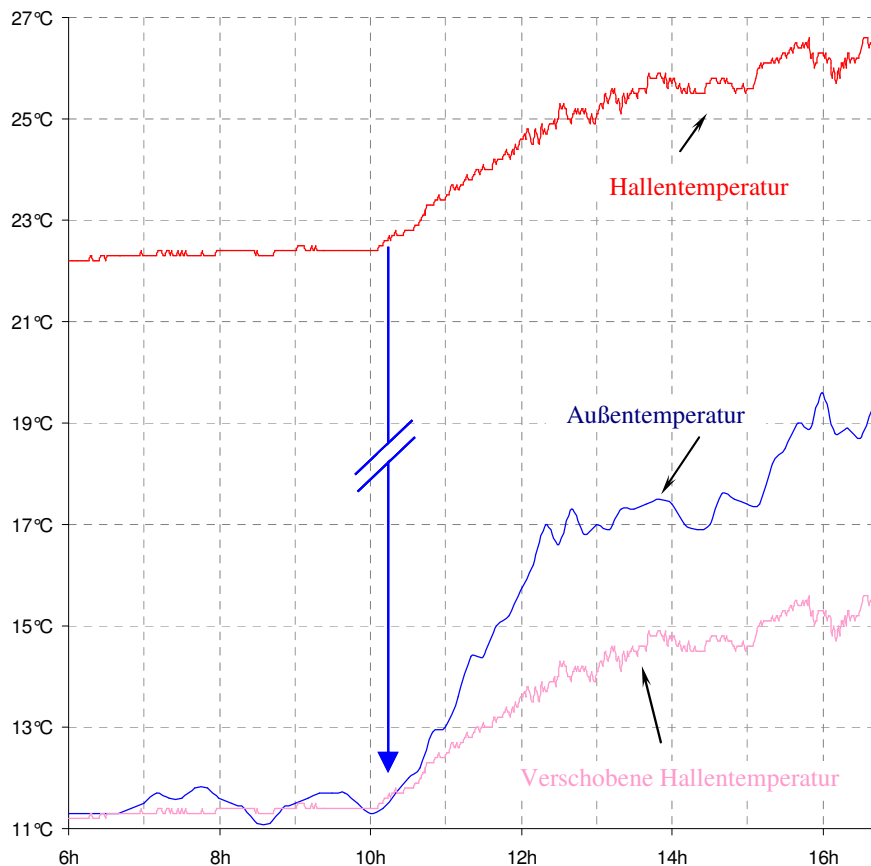


Abbildung 7.15 Verdeutlichung des Einfluss der Außentemperatur auf die Hallentemperatur

Zur Verdeutlichung des Zusammenhanges der Außen- und der Hallentemperatur, wurde der Graph der Hallentemperatur nach unten verschoben. Zu sehen ist, dass der Anstieg der Außentemperatur nahezu zeitgleich mit dem der Hallentemperatur erfolgt. Jedoch ist der Anstieg der Hallentemperatur nicht so steil. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein Bauwerk eine deutlich höhere Wärmekapazität hat als die Außenluft.¹²⁸

7.5.2 Jahreszeitlicher Zusammenhang der Temperaturschwankungen

Es wurde gezeigt, dass die Hallentemperatur maßgeblich von der Außentemperatur abhängt. Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in der Verteilung „Fehlerhäufigkeit der Produktion“ wieder. Im Sommer kommt es häufiger vor, dass Schleifmaschinen die Maschinenabnahme nicht bestehen als im Winter. Dieses ist auf die dann bessere ther-

¹²⁸ Vergleiche auch Tabelle 7.1 auf Seite 99.

mische Stabilität innerhalb der Montagehalle zurückzuführen. Temperaturschwankungen werden in dieser Zeit durch die Heizkörper abgefangen, wodurch sich die Hallentemperatur kaum ändert. Einen deutlichen Einfluss könnten zu dieser Jahreszeit jedoch das Öffnen von Türen und Toren haben. Leider liegen für den Winter keine Temperaturmessungen vor.

In den Diagrammen 7.16 und 7.17 wird jeweils ein Tag mit geringer und großer Temperaturänderung verglichen. Die Graphen geben die Temperatur am Maschinebett wieder.

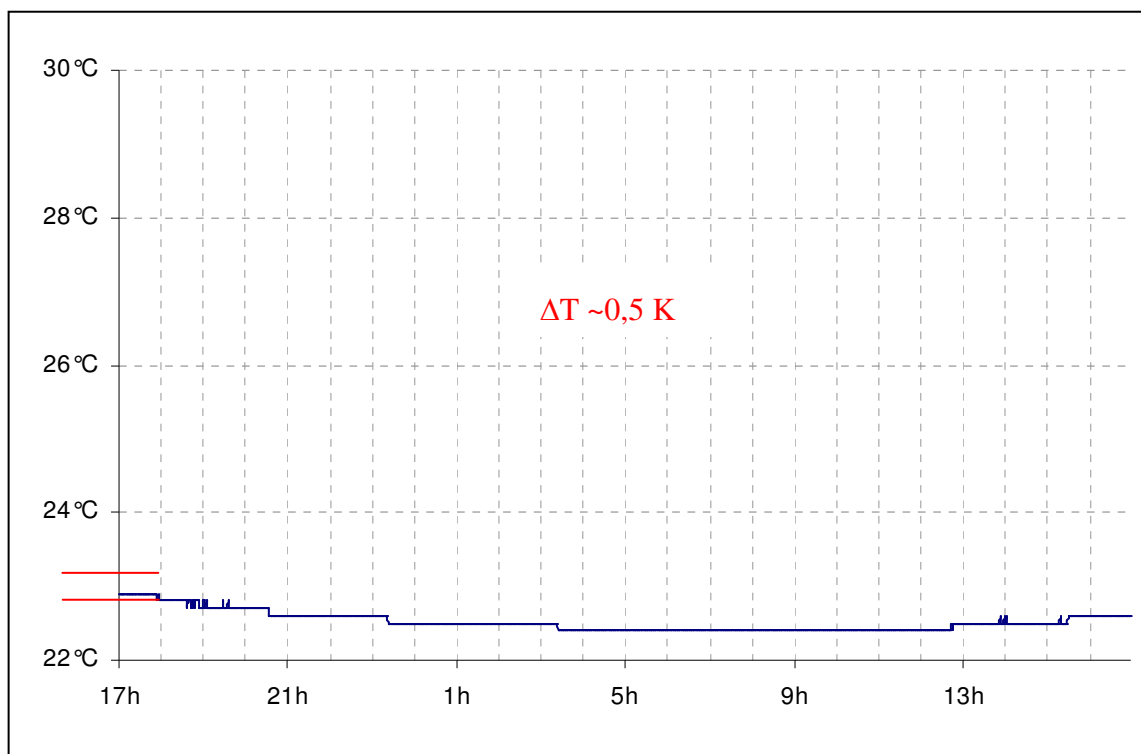


Abbildung 7.16 Temperatur am Maschinenbett an einem Tag ohne große Außentemperaturdifferenz

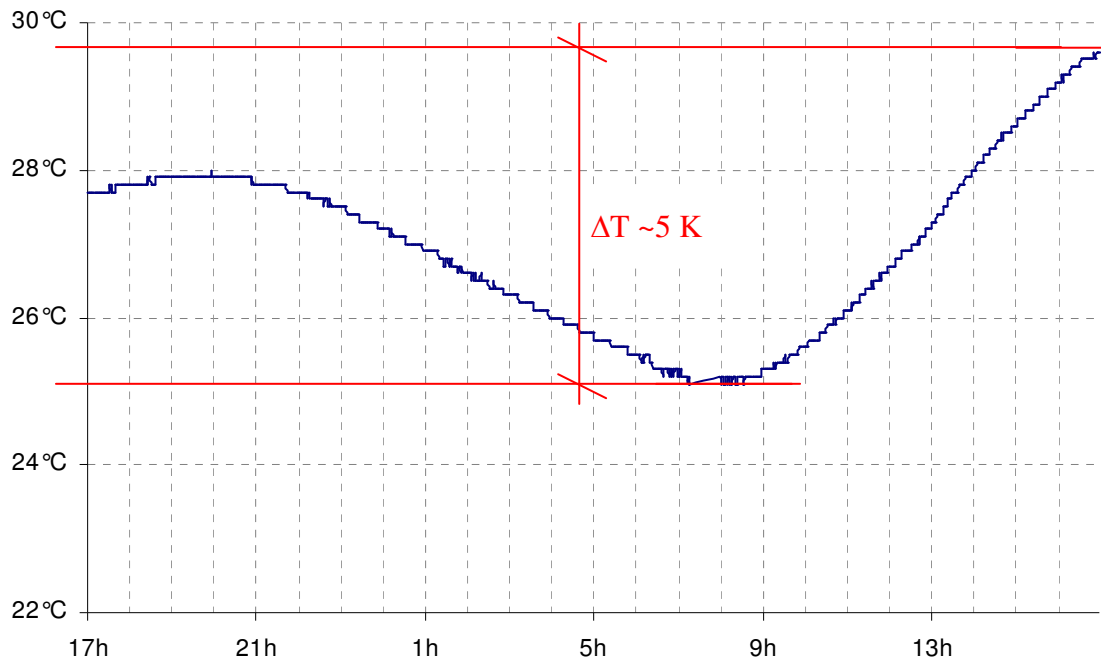


Abbildung 7.17 Temperatur am Maschinenbett an einem Tag mit großer Außentemperaturdifferenz

Mit diesen beiden Diagrammen wird im Vergleich deutlich warum die Montage im Sommer die größeren Probleme verursacht.

7.6 Untersuchung verschiedener Bereiche der Montagehallen auf Temperaturdifferenzen

Auch innerhalb der Montagehalle sind die Schwankungen der Temperatur unterschiedlich stark ausgeprägt. Die stärksten Temperaturschwankungen wurden im Bereich der Türen gemessen. Genau in diesem Bereich wurden aber die Temperaturempfindlichsten Maschinen gefertigt (Abbildung 7.10, Montagebereich 1).

Der thermisch stabilste Bereich der Montagehalle liegt im Montagebereich 2 (gemäß Abbildung 7.10), da die Einflüsse der Fenster und Türen¹²⁹ hier durch den größeren Abstand geringer sind. Die temperaturempfindlichen Maschinen sollten dort gefertigt werden. Auch können Trennwände im Gang den Einfluss von Zugluft weiter abmildern. In

¹²⁹ Vergleiche Abbildung 7.10 auf Seite 110.

Tests mit aufgestellter Pappe konnte dies aufgezeigt und eine gewisse thermische Stabilität erreicht werden. Es wurde an zwei nebeneinander stehenden Maschinen die Temperatur gemessen. Die mit Pappe geschützte Maschine wies dabei geringere Temperaturdifferenzen auf.

7.7 Versuch zur Temperaturstabilisierung mit Gebläsen

Um die Prozesssicherheit zu erhöhen, ist es nötig, die Temperaturdifferenzen innerhalb des Maschinenbettes möglichst gering zu halten. Der einfachste Weg wäre eine Klimatisierung. Da dieses jedoch sehr teuer und nicht kurzfristig realisierbar ist, wurden alternative Ansätze betrachtet.

Die Überlegungen führten zu dem Ergebnis, dass ein schnellerer Ausgleich von Temperaturdifferenzen innerhalb des Maschinenbettes herbeigeführt werden muss. Problematisch ist hierbei, dass ein Wärmeaustausch innerhalb des Maschinenbettes wegen der gekapselten Geometrie, mit relativ kleinen Öffnungen, nur eingeschränkt möglich ist. Es zeigte sich, dass morgens die Luft innerhalb des Bettes kälter ist als die Umgebungsluft.¹³⁰ Am späten Nachmittag ist es umgekehrt. Um möglichst schnell die Temperaturen anzugleichen, wurde mit verschiedenen Gebläsen Versuche durchgeführt, um die Zeit für einen Temperatúrausgleich zu reduzieren.

Als Ansatz dient die Formel (7.3) zeigt, dass der Wärmefluss \dot{Q} größer ist, umso größer die Temperaturdifferenz ΔT ist.

$$\dot{Q} = \lambda \frac{A}{l} \Delta T \quad (7.3)$$

Der Wärmefluss wiederum ist von der zu übertragenen Wärmemenge und der Zeit abhängig.¹³¹ Eine Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen dem System Maschinenbett, und dem der eingeschlossenen Luft, würde also zu einer schnelleren Anpassung

¹³⁰ Vergleiche Kapitel 7.2 auf Seite 100.

¹³¹ Vergleiche Formel (7.2).

führen. Im Idealfall entspricht die Temperatur des Maschinenbettes in allen Punkten der Raumtemperatur.

Im ersten Versuch kamen mehrere Gebläse zum Einsatz. Abbildung 7.18 zeigt einen Aufbau mit drei Gebläsen. Zu sehen ist die Draufsicht des Maschinenbettes. Die Gebläse leiten ihren Luftstrom in die vorhandenen Öffnungen und durchströmen dieses, beziehungsweise zugeführt. Ein weiterer Effekt ist die Änderung der Oberflächentemperatur, was einen höheren Wärmestrom innerhalb des Maschinenbettes zur Folge hat. Abends wird so vermehrt Wärme an die Umgebungsluft abgegeben und morgens wird diese vermehrt dem Maschinenbett zugeführt.

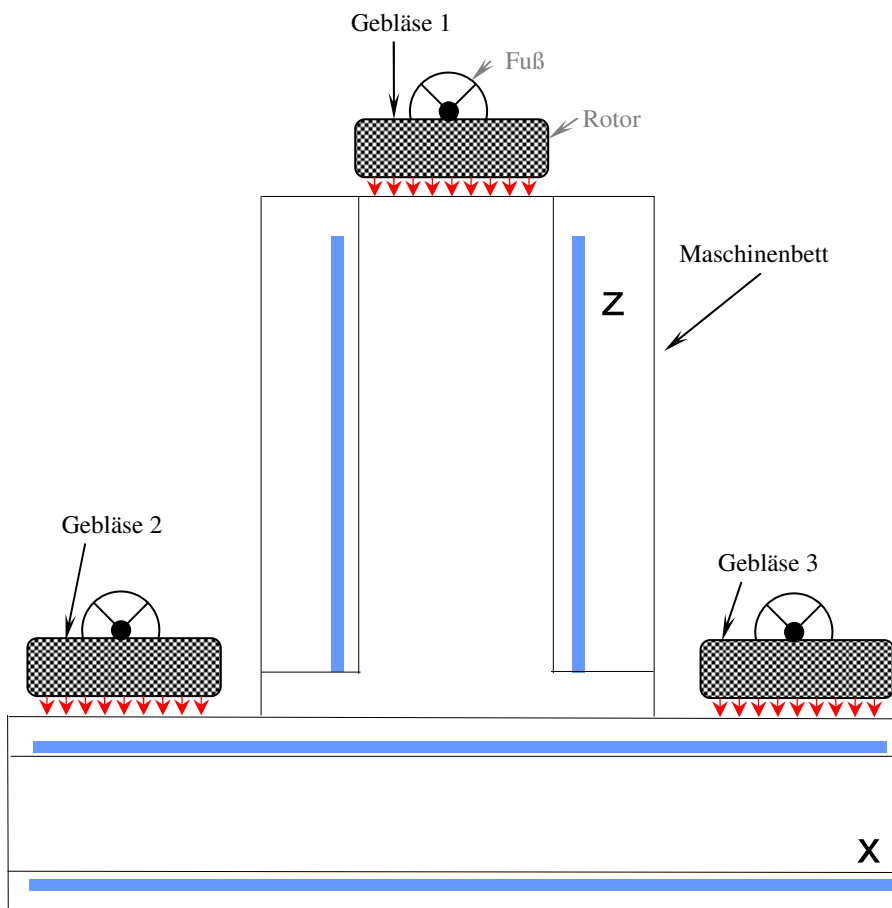


Abbildung 7.18 Prinzipskizze des Aufbaus mit drei Gebläsen

Es zeigte sich eine deutlich schnellere Anpassung zwischen der Raumtemperatur und dem Maschinenbett. An den Stellen der Gebläse 2 und 3 passte sich die Temperatur allerdings sehr viel schneller an, als im Bereich des Ständers. Zur besseren Anpassung

wurde ein leistungsfähigeres Gebläse 1 eingebaut und die Gebläse 2 und 3 vorerst entfernt (siehe Abbildung 7.19).

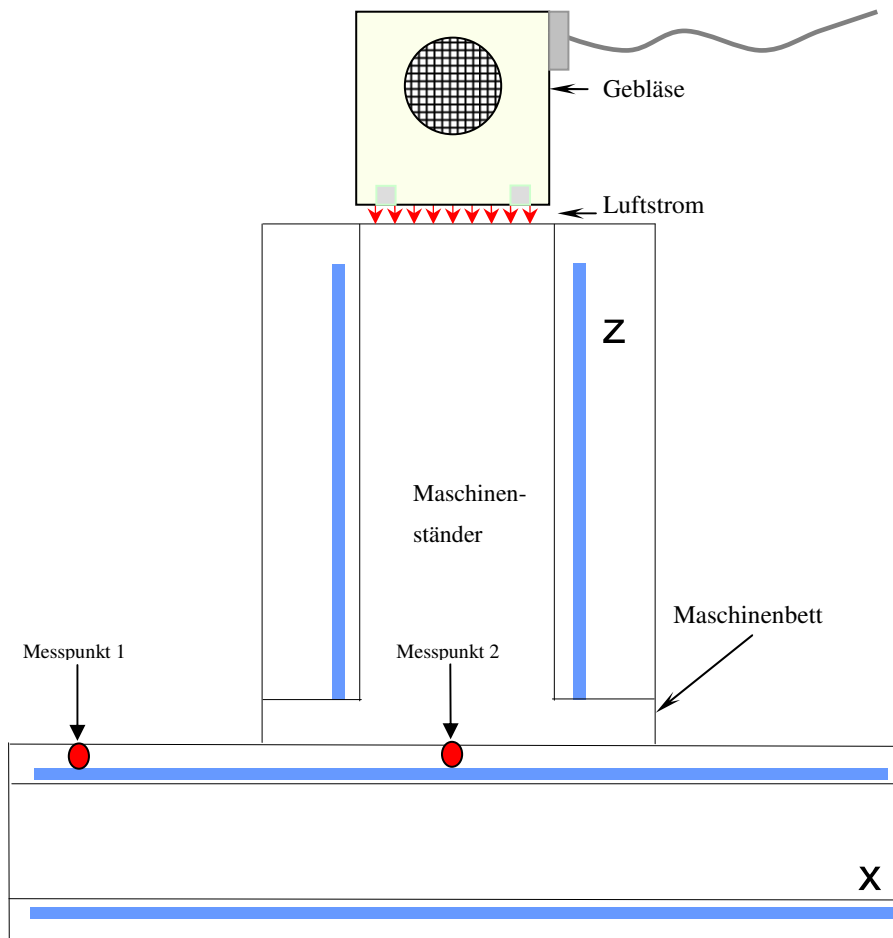


Abbildung 7.19 Prinzipskizze des Aufbaus mit einem Gebläse

Es zeigte sich eine sehr rasch der Raumtemperatur folgende Temperatur des Messpunkt 2. Bereiche, die nur im geringen Maße umströmt wurden, konnten sich allerdings nicht so schnell anpassen (Messpunkt 2 und 3).

Die Abbildung 7.20 zeigt einen Temperaturverlauf vom Mittelteil der Führungsbahn (blauer Graph, Messpunkt 2) in Bezug auf die Seite der Führungsbahn (roter Graph, Messpunkt 1).

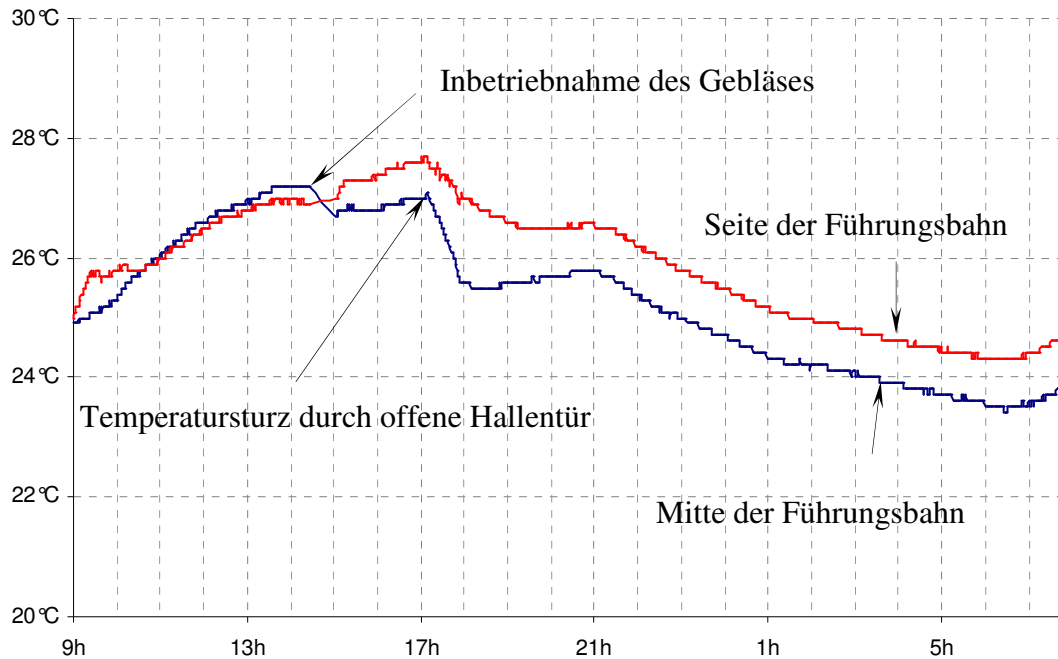


Abbildung 7.20 Temperaturverlauf mit starkem Gebläse

Mit dem Einsatz des leistungsfähigen Gebläses folgte die Temperatur des Ständers noch schneller der Hallentemperatur. Dies ist deutlich um 17:00 Uhr erkennbar, als eine Tür geöffnet wurde. Zu diesem Zeitpunkt fiel die Temperatur am Messpunkt 2 deutlich und schneller als die am Messpunkt 1. Zwischen den beiden Messpunkten stellte sich eine Temperaturdifferenz von knapp unter einem Grad ein. Das Gebläse passte den mittleren Bereich der Führungsbahn wesentlich schneller an die Raumtemperatur an. Bereiche die schlechter umströmt wurden, konnten sich nicht so schnell anpassen. Um die Luftströmung im Inneren zu verbessern, wurden bestimmte Teile des Maschinenbettes abgedichtet. Als Ideal stellte sich hierbei das Verschließen der vorderen beiden Öffnungen heraus (Abbildung 7.21).

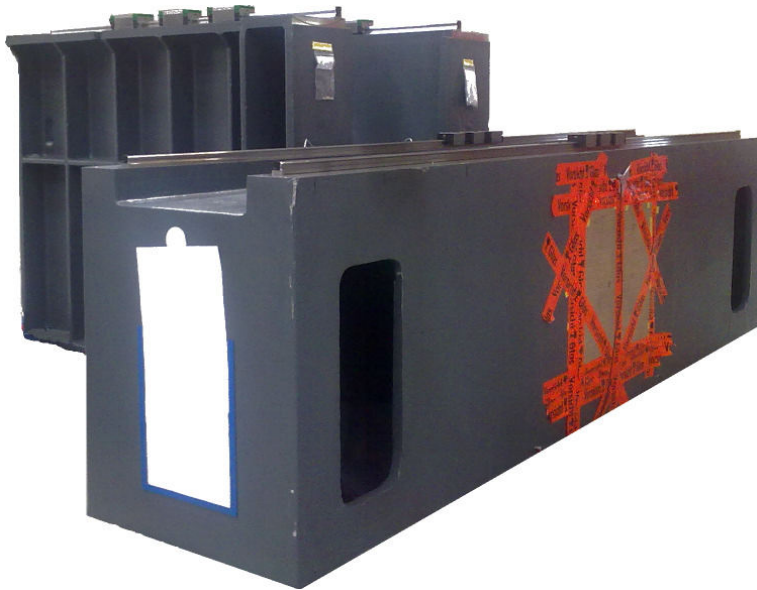


Abbildung 7.21 an der Front abgedichtetes Maschinenbett

Es wurden nun auch andere Bereiche des Maschinenbettes stärker mit Luft durchströmt und damit ein besserer Temperatenausgleich innerhalb des Bettes geschaffen. Ein Großteil der Luft gelangte nun durch Öffnungen an der Unterseite auch unter das Bett und somit kam es zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung an den unteren Teilen.

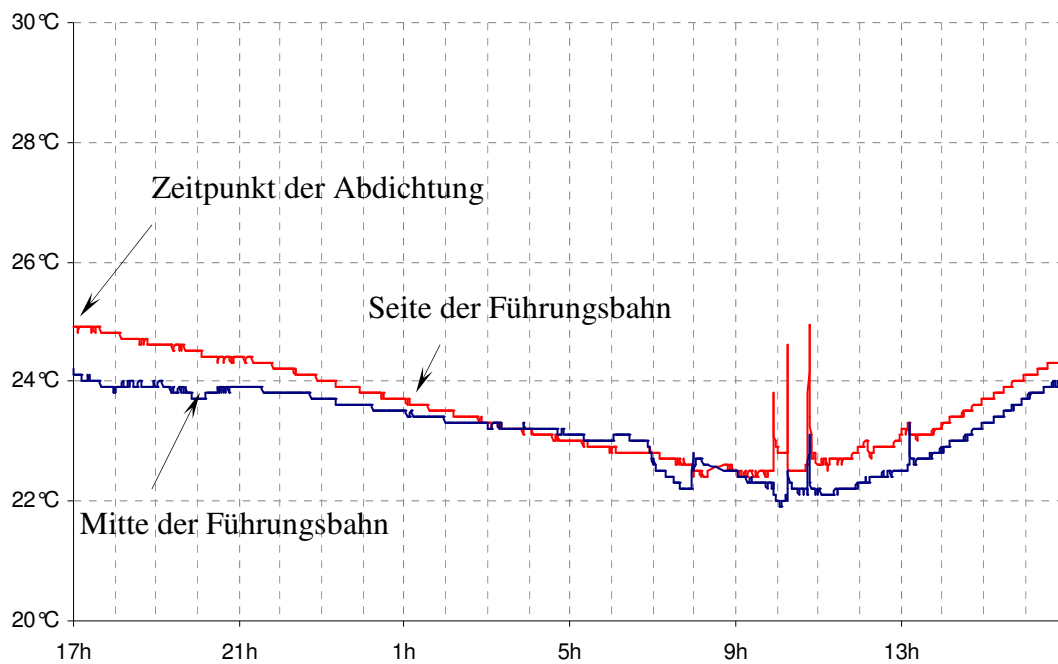


Abbildung 7.22 Einsatz des starken Gebläses unter Abdichtung der Front

Der in der Abbildung 7.22 gezeigte Temperaturverlauf weist zwischen den Messpunkten einen Unterschied von deutlich unter einem Grad auf. An allen Messtagen wurde darauf geachtet, dass vergleichbare Bedingungen herrschten. Mit dem Gebläse und der abgedichteten Front verringerte sich die Temperaturdifferenz an der Führungsbahn deutlich, wie Abbildung 7.23 beispielhaft zeigt.

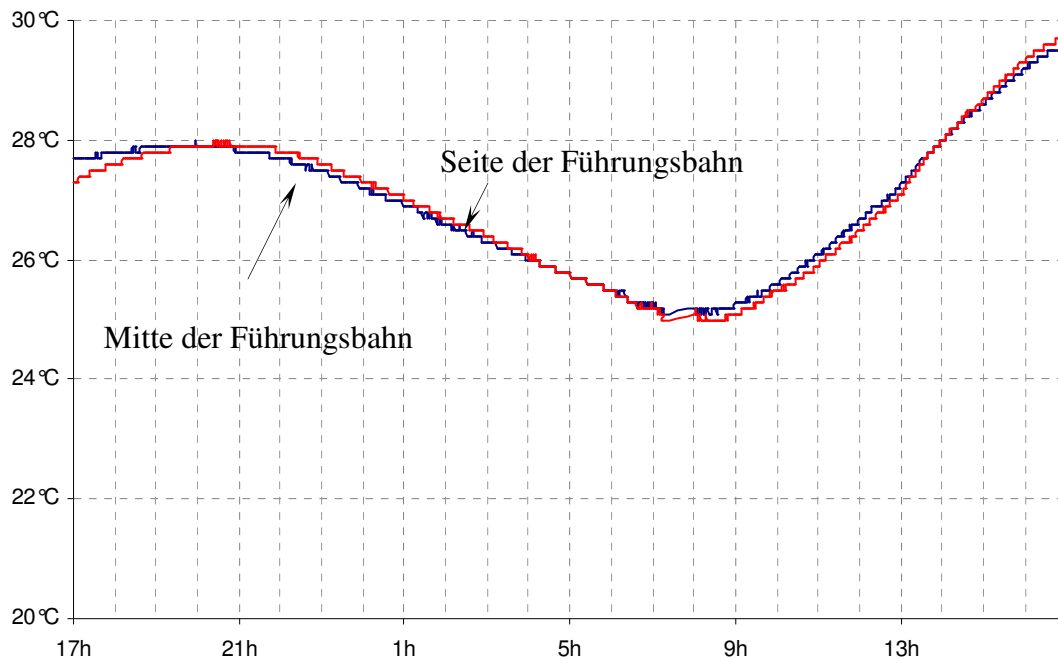


Abbildung 7.23 einfaches Gebläse mit abgedichteter Front

Der Temperaturverlauf an den beiden Messpunkten, ist nahezu übereinstimmend. Die in diesem Zeitraum durchgeführten Messergebnisse wiesen einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit auf.

Versuchsweise wurde auch die Montage der Linearführungen unter Einsatz der Gebläse durchgeführt. Nach anfänglicher Skepsis bei den Monteuren zeigte sich auch an sehr warmen Tagen eine leichtere Anpassbarkeit der Linearführungen und eine gute Akzeptanz.

Die Verwendung von Gebläsen zur schnelleren Temperaturanpassung hat sich als Alternative zu einer Klimaanlage als vielversprechend erwiesen. Eine Anpassung der Führungsbahnen sollte jedoch nur bei gleichzeitiger Temperaturüberwachung erfolgen. Im Falle größerer Temperaturdifferenzen am Maschinenbett, können auch hier Probleme bei der Montage auftreten. Beim Einsatz von Gebläsen ist ebenfalls darauf zu achten,

dass diese keine Schwingungen auf die Messgeräte ausüben können. Im Versuch wurden die Gebläse während den Messungen ausgeschaltet.

8 Ansätze zur Erhöhung der Prozesssicherheit

8.1 Klimatisierung der Montagehalle

Wie gezeigt, ist der thermische Einfluss eines der Hauptfaktoren auf die Prozesssicherheit bei Montage der Linearführungen. Gerade die langen Linearführungen der X-Achse reagieren in ihrer geometrischen Form besonders stark auf Temperaturänderungen. Es hat sich auch bestätigt, dass hierfür Temperaturunterschiede innerhalb des Bettes einen maßgeblichen Einfluss haben.¹³² Um den Montageprozess von äußeren thermischen Einflüssen, zu entkoppeln, bietet sich die Installation einer Klimaanlage an. Ohne thermische Einflüsse, ist die Anpassung der Linearführungen erheblich einfacher und die Messergebnisse sind untereinander vergleichbar. Ebenso könnten sich die Montagezeiten deutlich verkürzen, da der Anpassungsprozess im Sommer einfacher wird und mehr Maschinen die Endabnahme bestehen. Halleninterne thermische Einflüsse wie die Waldrich- Führungsbahnschleifmaschine, können zum größten Teil über die Klimaanlage thermisch kompensiert werden. Die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten sind allerdings ein großer Nachteil. (siehe dazu Tabelle 8.1).

¹³² Vergleiche Kapitel 6.1 Temperatur auf Seite 84.

Tabelle 8.1 Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle

Vorteile	Nachteile
Starke Reduzierung der äußeren Temperaturabhängigkeit	Sehr hohe Investitionskosten
Deutliche Erhöhung der Prozesssicherheit im Sommer	Hohe Betriebskosten
Kürzere Montagezeiten im Sommer	
Vergleichbare Messergebnisse	
Angenehmes Arbeitsklima	

8.2 Isolierung der Montagehalle

Eine weitere, kostengünstigere Alternative wäre es, das Dach der Montagehalle zu isolieren. Für gebäudeeffizienzsteigernde Projekte stehen gegebenenfalls staatliche Förderprogramme zur Verfügung, welche die Investitionskosten reduzieren könnten. Bei einer Isolierung handelt es sich um ein passives Mittel. Daher sind keine laufenden Kosten zu erwarten. Mit Hilfe einer Isolierung wäre es denkbar, dass bei schnellen Außentemperaturänderungen die Hallentemperatur träger reagiert und konstanter bleibt. Wie stark sich dies allerdings in der Prozesssicherheit widerspiegelt, hängt vom Grad der Isolierung ab. Halleninterne, thermische Einflüsse, werden allerdings nicht kompensiert und bleiben bestehen. Eine isolierte Halle wäre jedoch die Voraussetzung um nachträglich mit einer Klimaanlage ausgestattet zu werden. (siehe dazu Tabelle 8.2).

Tabelle 8.2 Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle

Vorteile	Nachteile
Reduzierung der äußeren Temperaturabhängigkeit	Eine gewisse Temperaturabhängigkeit bleibt vorhanden
Erhöhung der Prozesssicherheit im Sommer	
Vergleichbarere Messergebnisse	
Ggf. subventioniert	
Keine Betriebskosten	
Geringere Heizkosten im Winter	

8.3 Teilklimatisierung eines Bereiches innerhalb der Montagehalle

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, nicht die gesamte, sondern nur einen Teil der Montagehalle zu klimatisieren. Hier wären die Investitions- und Betriebskosten sehr viel geringer, als bei der Isolierung der gesamten Fabrikhalle. Die Größe der Klimazelle richtet sich nach dem Bedarf. So ist ein Faktor die Anzahl an Maschinen, die dort untergebracht werden sollen. Ein Maschinenbett benötigt eine gewisse Zeit sich thermisch der Raumtemperatur anzupassen¹³³. Darum sollte die Zelle genügend Platz mehrere Betten zur Akklimatisierung bieten. Ein Transport der Maschinenbetten ist bei diesem Ansatz allerdings unausweichlich. Allerdings bietet die Klimazelle im Gegensatz zur kompletten Hallenklimatisierung eine zusätzliche Entkopplung vor halleninternen, thermischen Einflüssen. (siehe dazu Tabelle 8.3).

¹³³ Vergleiche Kapitel 7.1 auf Seite 95.

Tabelle 8.3 Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle

Vorteile	Nachteile
Sehr stabile thermische Bedingungen	Materialtransport nötig
Deutliche Erhöhung der Prozesssicherheit	
Kürzere Montagezeiten im Sommer	
Vergleichbare Messergebnisse	
Kostengünstiger Betrieb	
Entkopplung vor halleninternen thermischen Einflüssen	

8.4 Verlegung des Montageorts

Bei den Untersuchungen der Temperaturen innerhalb der Montagehallen wurde festgestellt, dass die Temperaturschwankungen in der betrachteten Halle 14¹³⁴ mit am größten sind. Dies ist ungünstig, da es sich gerade bei der Montage und Anpassung der Führungsbahnen um einen sehr sensiblen und temperaturempfindlichen Prozess handelt.¹³⁵ Aus dieser Überlegung heraus wäre es vorteilhaft, die Montage in eine besser geeignete Halle zu verlegen. Hierbei wird allerdings das Problem der Temperaturschwankungen nicht beseitigt. Es wird lediglich zu einem gewissen Grad reduziert.

8.5 Verlegung der Montageplätze

Es hat sich gezeigt, dass große Maschinenbetten und Führungen stärker durch Temperaturschwankungen beeinflusst werden als kleinere. Ebenso zeigte sich, dass nicht alle

¹³⁴ Vergleiche Kapitel 7.5 Einflüsse auf die Hallentemperatur 109.

¹³⁵ Vergleiche Kapitel 6.1 Temperatur auf Seite 84.

Bereiche der betrachteten Montagehalle gleichermaßen von den Temperaturschwankungen betroffen sind¹³⁶, die im Sommer unter anderem durch geöffnete Fenster und Türen zu Stande¹³⁷ kommen. Es ist zu überlegen, ob temperaturempfindliche Maschinen an der fensterlosen Wandseite (Montagebereich 2)¹³⁸ der Montagehalle 14 zu fertigen. In diesem Teil der Halle wurden geringere Temperaturunterschiede gemessen.

8.6 Wetterabhängige Produktionsplanung

Bei großen Temperaturunterschieden sollten wenn möglich Maschinen mit kürzeren Achsen gefertigt werden. Die temperaturbedingten Geometrieänderungen sind bei den Maschinen geringer, als bei denen mit längeren Achsen.

8.7 Einsatz von Trennwänden

Einfache Trennwände können dafür sorgen, dass die Maschinenbetten vor Zugluft geschützt werden. Eine unachtsam offenstehende Tür im Sommer hatte innerhalb eines Maschinenbettes zu einer Temperaturänderung von zwei Grad geführt, was wiederum zu einer Formänderung von mehreren Mikrometern führte. Im Versuch zeigte sich, dass ein von Trennwänden umgebenes Maschinenbett wesentlich geringere Temperaturunterschiede aufwies, im Vergleich zu einem welches frei stand.

8.8 Einsatz von Gebläsen

Die Klimatisierung der Montagehalle und die Teilisolierung bestimmter Bereiche sind sehr kostenintensiv. Eine sehr günstige Alternative zeigte sich durch den Einsatz von Gebläsen. Schon ein einfaches Gebläse mit Drehzahlregelung, konnte Temperaturdifferenzen im Maschinenbett ausgleichen¹³⁹. Mit einer abisolierten Front konnte dieser Effekt noch verstärkt werden.

¹³⁶ Vergleiche Kapitel 7.6 auf Seite 118.

¹³⁷ Vergleiche Kapitel 7.5.1 auf Seite 112.

¹³⁸ Vergleiche Abbildung 7.10 auf Seite 110.

¹³⁹ Vergleiche Kapitel 7.7 Versuch zur Temperaturstabilisierung mit Gebläsen auf Seite 119.

Die thermische Anpassung hängt unter anderem davon ab, wie gut die Bereiche des Maschinenbettes von der Luft umströmt werden. Für eine optimale Verteilung der Luft könnte sich ein System mit Schläuchen eignen.

Die Abbildung 8.1 zeigt ein Modell eines Ideenentwurfs.

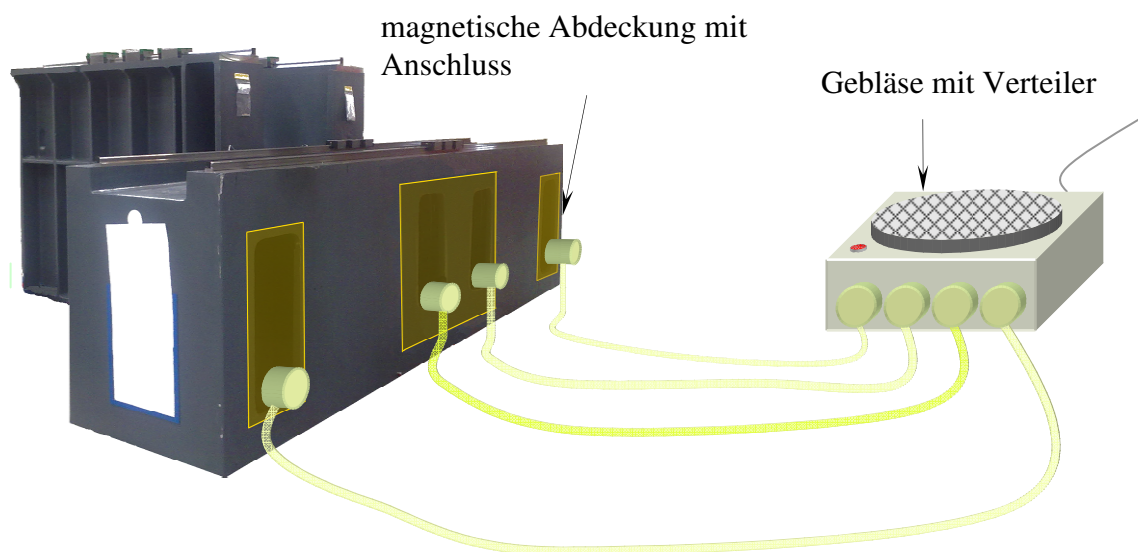


Abbildung 8.1 Modell eines Gebläses mit magnetischen Anschlussplatten

Die Luft wird über magnetische Abdeckungen in das Maschinenbett geleitet. Das Gebläse ist somit in sehr kurzer Zeit, ohne weitere Hilfsmittel, installierbar. Die Schläuche können auch unter der Maschine verlegt werden, um eine gute Erreichbarkeit der X-Achse zu gewährleisten. Weitere Vorteile der Schläuche sind der Schutz vor einer Vibrationsübertragung, die Anschlussmöglichkeit weiterer Maschinen und Reduzierung der Geräuschemission auf den Monteur. Ein solches Gebläse kann in größerer Entfernung zum Montageplatz stehen oder auch außerhalb des Gebäudes. Über Luftklappen in den Anschlussbuchsen könnte der Luftstrom gelenkt, und in der Menge für jeden Bereich und Maschinentyp angepasst werden. Denkbar wäre hierbei auch eine Regelung des Luftstromes über Temperaturfühler und eine elektronische Regelungstechnik. (siehe dazu Tabelle 8.4).

Tabelle 8.4 Vor- und Nachteile eines Gebläses

Vorteile	Nachteile
Reduzierung der Temperaturdifferenzen	Geringe Temperaturdifferenzen bleiben erhalten ¹⁴⁰
Erhöhung der Prozesssicherheit	
Kürzere Montagezeiten im Sommer	
Vergleichbarere Messergebnisse	
Kostengünstig	
Individuell einsetzbar	

8.9 Einführung eines qualitätssichernden Produktionsschritts

Die Grundproblematik der hohen Kosten für Nacharbeit¹⁴¹ ergibt sich aus dem späten Erkennen von unzulässigen Führungsbahnabweichungen. Die ungenügende Genauigkeit einer Schleifmaschine wird erst dann erkannt, wenn diese bereits fertig montiert ist. Vorteilhaft wäre es, wenn dieses schon während der Montage erkannt wird. Eine Problemlösung könnte ein zusätzlicher, qualitätssichernder Fertigungsschritt sein. Vor allem an Tagen mit stark veränderlicher Außentemperatur könnte dieser die Prozesssicherheit erhöhen.

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Verfahren ausprobiert¹⁴² und bewertet. Eine Messung mit der elektronischen Neigungsmesswaage mit dem fertig montierten Tisch ist sehr schwierig. Sie hat auf Grund der sehr wenigen Schritte, die mit dem langen Tisch abgefahren werden können, auch nur eine geringe Aussagekraft. Auch der Einsatz des Autokollimators scheint ebenso ungeeignet, da auch die Geradheitsmessungen, wie die Messungen mit der elektronischen Neigungswaage, auf zu wenig Messschritte beschränkt wären. Das Abfahren der Tischgeometrie mit einem Messbalken und

¹⁴⁰ Vergleiche Kapitel 7.2 auf Seite 100.

¹⁴¹ Vergleiche Kapitel 1.3 auf Seite 12.

¹⁴² Vergleiche Kapitel 8.9 Einführung eines qualitätssichernden auf Seite 132.

inkrementellem Messtaster¹⁴³ könnte die gewünschte Genauigkeit bringen, sofern der Messbalken die nötige Genauigkeit aufweist. Was die Nutzung eines Messbalkens erschwert, ist das hohe Gewicht und die Gefahr einer Beschädigung der Maschine und des Messbalkens. Auch können verschlissene Messbalken zu falschen Ergebnissen führen. Von Vorteil ist es jedoch, dass diese schon vorhanden sind und das Messergebnis im Gegensatz zum Autokollimationsfernrohr und der elektronischen Neigungsmesswaage nicht von Folgefehlern¹⁴⁴ beeinflusst wird.

Ein gut geeignetes Messgerät ist das Laserinterferometer. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, es ist damit möglich den fertigen Maschinentisch, direkt nach der Montage zu vermessen. Liegen die Messwerte außerhalb der zulässigen Toleranz, so kann in diesem Montageschritt noch unproblematisch nachgearbeitet werden. (siehe Tabelle 8.5).

Tabelle 8.5 Vor- und Nachteile der Einführung eines qualitätssichernden Schrittes

Vorteile	Nachteile
Gut in den Montageprozess integrierbar	Nur bei konstanter Raumtemperatur aussagekräftige Messergebnisse
Keine Anschaffungskosten (vorhanden)	Eventuell schwingungsempfindlich ¹⁴⁵
Durchgängige Messung der Führungsbahn	
Hohe Genauigkeit	

8.10 Neugestaltung des Maschinenbettes

Eine weitere theoretische Verbesserung könnte die Neugestaltung des Maschinenbettes mit sich bringen.

¹⁴³ Vergleiche Kapitel 5.4 auf Seite 75.

¹⁴⁴ Vergleiche Kapitel 3.1 auf Seite 25.

¹⁴⁵ Bei Einsatz eines Lasermessverfahrens.

Auf die Versteifungen im Inneren zu verzichten wird wohl zu Genauigkeitseinbußen bei Krafteinwirkung führen, jedoch sollte die Maschine thermisch vom Ständer entkoppelt werden. Der Ständer hat einen großen thermischen Einfluss auf das Maschinenbett, denn er fungiert als Wärmespeicher.

Im Versuch zeigten sich markante Punkte bei der Verformung der Führungsbahn. Auffällig war, dass lokale Extrempunkte an den Versteifungen der Führungsbahn lagen. Auch diese Bereiche könnten ein Verbesserungspotential bieten. Ziel von konstruktiven Änderungen sollte es sein, dass die Maschine eine höhere thermosymmetrische¹⁴⁶ Stabilität aufweist.

Ein idealer Werkstoff des Maschinenbettes hat einen sehr geringen Temperatúrausdehnungskoeffizienten. Ein möglicher Werkstoff könnte Mineralguss, beziehungsweise Polymerbeton sein. Mineralguss hat, im Vergleich zu Grauguss, eine wesentlich höhere Dämpfungseigenschaft¹⁴⁷. Durch seine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit ergibt sich eine thermische Langzeitstabilität.¹⁴⁸ Obwohl Mineralguss einen dem Grauguss vergleichbaren Temperatúrausdehnungskoeffizienten hat, reagiert es auf Grund der etwa 20-fach geringeren Wärmeleitfähigkeit wesentlich träger auf Temperaturveränderungen. Kurzzeitige Temperaturschwankungen haben kaum Einfluss.¹⁴⁹

Weitere thermische Verbesserungsmöglichkeiten des Maschinenbettes bieten Kühlmitteleisläufe im Inneren des Maschinenbettes, sowie eine thermische Isolierung gegen Temperatureinflüsse.

¹⁴⁶ Vergleich Kapitel 7.2 auf Seite 100.

¹⁴⁷ Prof. Dr. Tschätsch, Heinz: Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung ; mit 154 Tabellen; Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden 2007, Seite 309.

¹⁴⁸ Prof. Dr. Weinert, Klaus: Spanende Fertigung, 60. Auflage; Vulkan Verlag Essen 2001, Seite 417.

¹⁴⁹ Prof. Dr. Hoffmeister H.-W.; Prof. Dr. Tönshoff, Hans K. : Jahrbuch Schleifen, Honen, Lap-
pen und Polieren: Verfahren und Maschinen 3. Auflage; Vulkan Verlag Essen 2001,
Seite 270.

Literaturverzeichnis

1. **Prof. (em.) Dr. Bantel, Martin:**
Messgeräte-Praxis,
Carl Hansa Verlag, München Wien, 2004.
2. **Prof. Dr. Berns, Hans; Prof. Dr. Theisen, Werner:**
Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen,
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
3. **Prof. Dr. Böckh, Peter, Prof. Dr. Wetzel, Thomas:**
Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis,
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
4. **Prof. Dr. Böge, Alfred:**
Handbuch Maschinenbau:
Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik,
Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
5. **Prof. Dr. Bošnjaković, Fran; Prof. Dr. Knoche, K. F.:**
Technische Thermodynamik, Teil 1,
Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt, 1998.
6. **Prof. Dr. Fritz, A Herbert; Prof. Dr. Schulze, Günter:**
Fertigungstechnik,
Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.
7. **Prof. Dr. Gevatter, Hans-Jürgen; Prof. Dr. Grünhaupt, Ulrich:**
Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
8. **Prof. Dr. Grote, Karl-Heinrich; Prof. Dr. Feldhusen, Jörg:**
Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau,
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 22. Auflage, 2007.
9. **Prof. Dr. Harten, Ulrich:**
Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler,
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.

10. **Dr. Hasse, Stephan:**
Gießerei-Lexikon,
Schiele & Schön Verlag Berlin, 2008.
11. **Prof. Dr. Hirsch, Andreas:**
Werkzeugmaschinen: Grundlagen : Lehr- und Übungsbuch,
Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 2000.
12. **Dipl. Ing. Kabus, Karlheinz:**
Mechanik und Festigkeitslehre,
Hansa Verlag München, 2009.
13. **Prof. Dr. Keferstein, Claus P.:**
Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren,
Vieweg+Teubner Verlag & Springer Fachmedien Wiesbaden, 2011.
14. **Prof. Dr. Knoche, K. F.; Bošnjaković, Fran:**
Technische Thermodynamik, Teil 1,
Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, GmbH & Co. KG Darmstadt, 1998.
15. **Prof. Dr. Künne, Bernd:**
Einführung in die Maschinenelemente,
Teubner Verlag Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2001.
16. **Prof. Dr. Litfin, Gerd:**
Technische Optik in der Praxis,
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
17. **Prof. Dr. Marek, Rudi; Prof. Dr. Nitsche, Klaus:**
Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen, Anwendungen, Übungsaufgaben,
Carl Hansa Verlag München, 2007.
18. **Prof. Dr. Mayr, Martin:**
Technische Mechanik:
Statik- Kinematik- Kinetik- Schwingungen- Festigkeitslehre,
Carl Hansa Verlag München Wien, 2008.

19. **Prof. Dr. Paucksch, Eberhard; Prof. Dr. Holsten, Sven; Prof. Dr. Linß, Marco; Prof. Dr. Tikal, Franz:**
Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien,
Vieweg + Teubner Verlag, GWV Fachwerke GmbH Wiesbaden, 2008.
20. **Prof. Dr. Perović, Božina:**
Bauarten spanender Werkzeugmaschinen,
Expertverlag Renningen, 2002.
21. **Prof. Dr. Pfeifer, Tilo; Prof. Dr. Schmitt, Robert:**
Fertigungsmesstechnik,
Oldenburgverlag München, 2010.
22. **Prof. Dr. Pfeifer, Tilo:**
Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Grössen in der Fertigung.
Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele,
Expertverlag Ehningen, 1993.
23. **Renishaw Broschüre:**
Systeme zur Überprüfung der Maschinengenauigkeit & Kalibrierung,
(o.O.) Herausgabejahr: 2011.
24. **Firma Renishaw:**
Laser-Handbuch Geradheitsmessung,
Version 2.1, 2007.
25. **Dr. Tabatbaei, Nejat Mahdavi:**
Zur inertialen Bahnvermessung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Robotern,
Kassel University Press GmbH, 2009.
26. **Prof. Dr. Tschätsch, Heinz:**
Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung ; mit 154 Tabellen,
Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007.
27. **Prof. Dr. Weck, Manfred; Prof. Dr. Brecher, Christian:**
Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

28. **Prof. Dr. Weck, Manfred, Prof. Dr. Brecher, Christian:**
Werkzeugmaschinen 5:
Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität,
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
29. **Prof. Dr. Weck, Manfred; Prof. Dr. Brecher, Christian:**
Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung,
Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
30. **Prof. Dr. Weichert; Prof. Dr. Norbert; Wülker, Michael:**
Messtechnik und Messdatenerfassung,
Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010.
31. **Prof. Dr. Weigand, Bernhard; Prof. Dr. Köhler; Prof. Dr. Jürgen; von Wolfersdorf, Jens:**
Thermodynamik kompakt,
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
32. **Winkler, Peter:**
PC Lexikon 2005,
Markt + Technik Verlag, München 2005.
33. **Firma Wyler:**
Handbuch: Mess- und Auswertesystem mit Wyler Geometriemessprogramm LE-
VELSOFT PRO. (o.O., o.J.)
34. **Prof. Dr. Weinert, Klaus:**
Spanende Fertigung, ,
Vulkan Verlag Essen, 3. Auflage, 2001.
35. **Prof. Dr. Windisch:**
Thermodynamik: Ein Lehrbuch für Ingenieure,
Oldenburg Wissenschaftsverlag München, 2008.
36. **Prof. Ruß, August Georg:**
Linearlager und Linearführungssysteme:
Einsatzmöglichkeiten - Berechnung – Auslegung,
Expert Verlag Renningen, 2000.

Anhang

A1 Erläuterung der eingesetzten Software

Die Übertragung der Daten aus dem Testo175-Datenlogger¹⁵⁰ erfolgte mit der Testo „Comfort Software Basic“ Version 5.0. Mit dieser Software wurde der Datenlogger programmiert. Die Messwerte wurden mit der internen Exportfunktion in die Windows Zwischenablage exportiert.

Ein Problem bei der Auswertung der Daten stellte die begrenzte Möglichkeit von Microsoft Excel dar, mit fortlaufenden Messdaten umzugehen. Excel erstellt zwar relativ komplexe Diagramme, bietet allerdings in der verwendeten Version „2003“ keine Möglichkeit innerhalb eines Diagramms zu zoomen oder einen Graphen zu verschieben. Bei einem sehr großen Datensatz ist es somit nur möglich, für zeitliche Ausschnitte jeweils ein eigenes Diagramm zu erstellen. Um dennoch Excel einsetzen zu können, wurden für die Diplomarbeit einige Visual Basic Makros erstellt. Diese erweitern Excel um weitere Funktionen.¹⁵¹

¹⁵⁰ Vergleiche Glossar unter A2.21 Temperaturdatenlogger auf Seite 149.

¹⁵¹ Vergleiche Anhang A4 (CD).

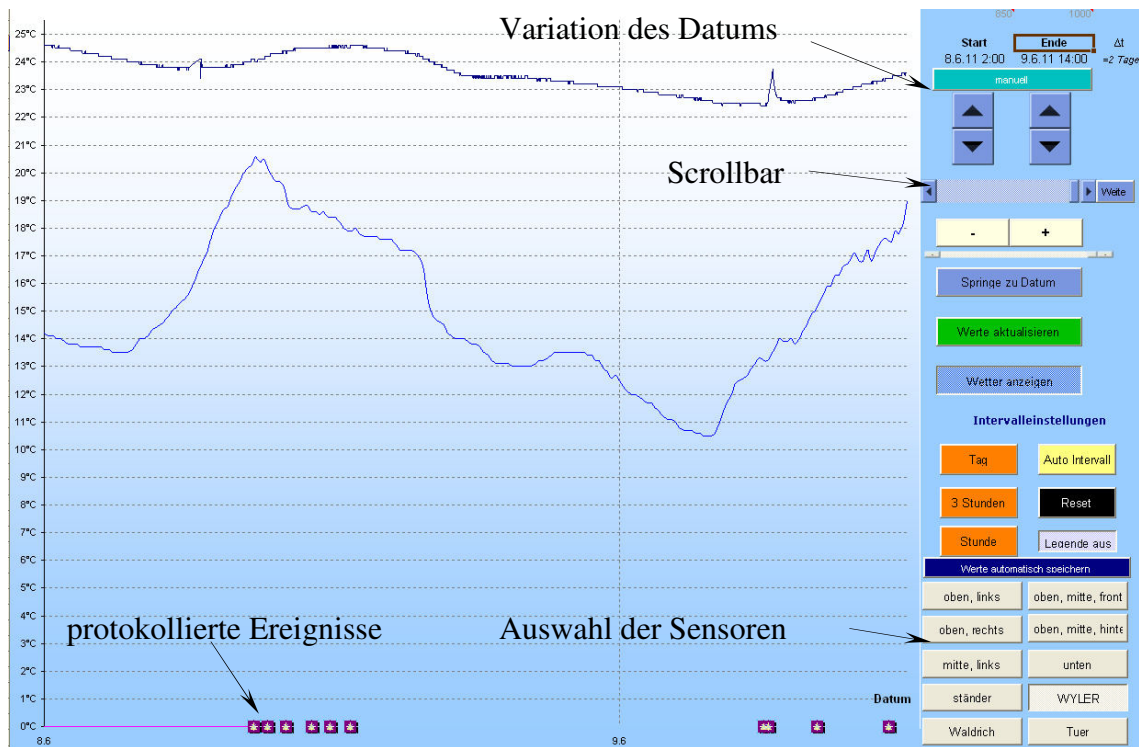


Abbildung E0.1 Excel Tabelle mit Visual Basic Erweiterung

Die Abbildung E0.1 zeigt eine Steuerungsoberfläche mit anpassbarem Diagramm. Die Oberfläche verfügt über einen Zoom-Regler, eine Verschiebungsfunktion und eine Direktanwahlfunktion zum Datumswechsel. Über die unten rechts gezeigten Schaltflächen ist es möglich, verschiedene Temperaturgraphen ein- und auszublenden. Die Punkte im unteren Teil des Diagramms dienen der Information über Ereignisse. Fährt man mit der Maus über eines dieser Punkte, werden Details zu den jeweiligen Zeitpunkten angezeigt. Beispielsweise dem Einschalten eines Gebläses oder dem Öffnen der Hallentür. Die jeweiligen Informationen werden hierfür aus dem Protokoll entnommen.

Mit dieser, für die thermische Untersuchung erstellten Erweiterung, war es möglich, einen schnellen Überblick über Temperaturänderungen zu erhalten und verschiedene Ausschnitte miteinander detailliert zu vergleichen. Die Achseneinteilung erfolgt automatisch. Angezeigte Ausschnitte können mit den dazugehörigen Optionen und Formattierungen gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen werden.

Die Abbildung E0.2 zeigt das Protokollsystem, indem die nötigen Daten abgelegt werden und jederzeit wieder aufrufbar sind.

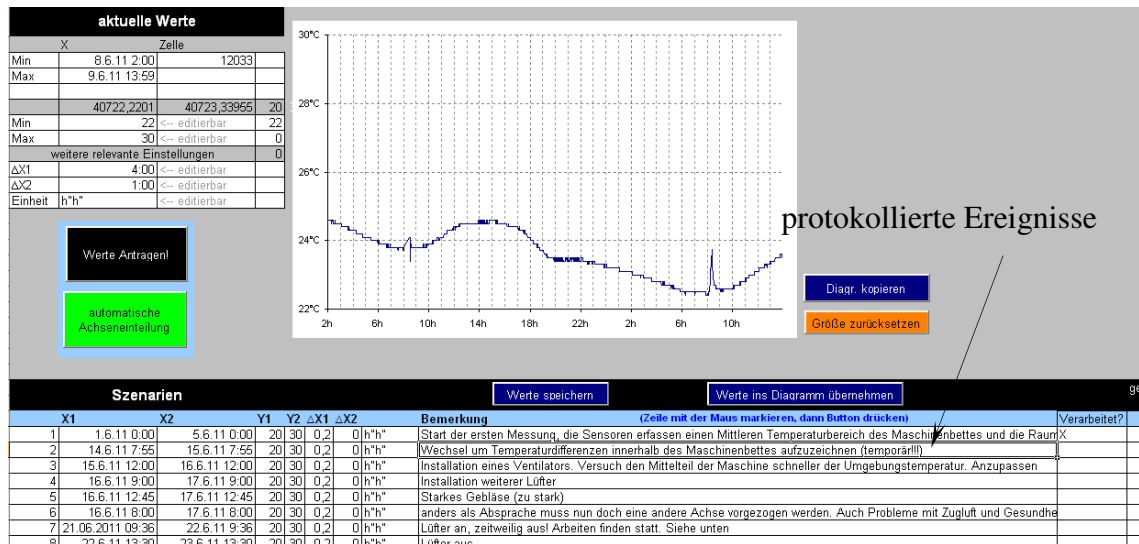


Abbildung E0.2 Protokoll der Excel Tabelle

Über die Schaltflächen können die Ausschnitte gespeichert oder geladen werden. Gespeichert werden diese im Unteren Tabellenbereich mit den jeweiligen Achseneinstellungen und der Bezeichnung. Diese Funktion bietet ein schnelles Wiederfinden und die Möglichkeit Ausschnitte gezielt miteinander zu vergleichen. Ein Laden der einzelnen Ausschnitte ist ebenso möglich, in dem eine Zeile ausgewählt und der Button „Werte ins Diagramm übernehmen“ angeklickt wird.

Eine Kopie der Excel-Datei befindet sich im Anhang A4 (CD).

A2 Glossar

A2.1 Alterung

Unter der Alterung von metallischen Werkstoffen versteht man eine allmähliche Veränderung des Gefüges, als Folge von Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen. Durch die Alterung verändern sich die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Nach dem Gießen oder durch Kaltverformung kommt es bei bestimmten Werkstoffen zur natürlichen Alterung. Dem gegenüber steht die künstliche Alterung.¹⁵² Langsam alternde Werkstoffe sind unerwünscht. Bei der Alterung nimmt in der Regel die Härte des Werkstoffes zu.¹⁵³

A2.2 CCD (Charge Coupled Device)

Ein CCD ist ein Feld aus sehr vielen dicht nebeneinander liegenden einzelnen MOS-Dioden.

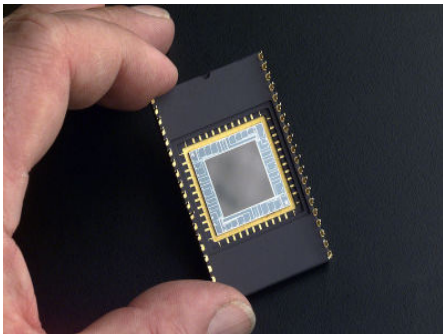


Abbildung G0.1 Abbildung eines CCD-Sensors¹⁵⁴

Das Licht erzeugt in jeder Diode eine elektrische Ladung. Durch Anlegen einer geeigneten Folge an Taktimpulsen werden die angesammelten Ladungen, über die Matrix des

¹⁵² Siehe im Glossar unter A2.12 Künstliche Alterung auf Seite 145.

¹⁵³ Dr. Hasse, Stephan: Gießerei-Lexikon; Schiele&Schön Verlag Berlin 2008, Seite 36f.

¹⁵⁴ Bildquelle: www.free-photos.biz.

Chips hinweg, zu dessen Ausgang übertragen. Hier werden sie in Spannungen umgewandelt. Bei Belichtung eines Bereichs kann ein Computer so die horizontale und vertikale Position berechnen.¹⁵⁵

A2.3 Computerschnittstelle

Eine Schnittstelle beim Computer dient als Ein- und Ausgabeport von Daten. An ihr können Geräte wie Drucker, Scanner, Modem oder Messgeräte betrieben werden.¹⁵⁶ Heutige Computersysteme verfügen über eine Vielzahl an Schnittstellen. Die wohl bekanntesten sind USB und RS232.

A2.4 Differentialkondensator

Beim Differentialkondensator werden zwischen den äußeren Kondensatorplatten und der beweglichen Mittelplatte jeweils Teilkapazitäten gebildet. Die Kapazität hängt hierbei von der Position der Mittelplatte, in Relation von den äußeren Kondensatorplatten, ab. Als Sensor bewirkt eine Lageänderung des Sensorelements gleichzeitig eine Erhöhung der einen, und eine Erniedrigung der anderen Teilkapazität des Differentialkondensators. Aus diesen Änderungen kann auf die Position der Mittelplatte geschlossen werden. Differentialkondensatoren kommen hauptsächlich in Vorrichtungen zur Messung von Auslenkungen aus der Null-Lage zum Einsatz. Die in dieser Arbeit beschriebene Neigungswaage, besitzt als Hauptmesskomponente einen Differentialkondensator als mechanisches Sensorelement.

¹⁵⁵ Zitat: Dr. Tabatbaei, Nejat Mahdavi: Zur inertialen Bahnvermessung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Robotern; Kassel University Press GmbH, 2009.

¹⁵⁶ Winkler, Peter: PC Lexikon 2005; Markt + Technik Verlag, München, 2005.

A2.5 Ebenheit

Die Ebenheit kann als eine Fläche angenommen werden, die durch drei Punkte aufgespannt wird. In der Theorie ist diese ideal eben. Reale Ebenen sind jedoch niemals eben.¹⁵⁷

A2.6 Gestellbauformen

Die Abbildung G0.2 zeigt die verschiedenen Bauformen der Maschinengestelle.

Die PLANOMAT-Schleifmaschine ist nach der Kreuzbettbauweise gebaut. Hier kreuzen sich die X- und die Z-Achse und sind daher namensgebend.

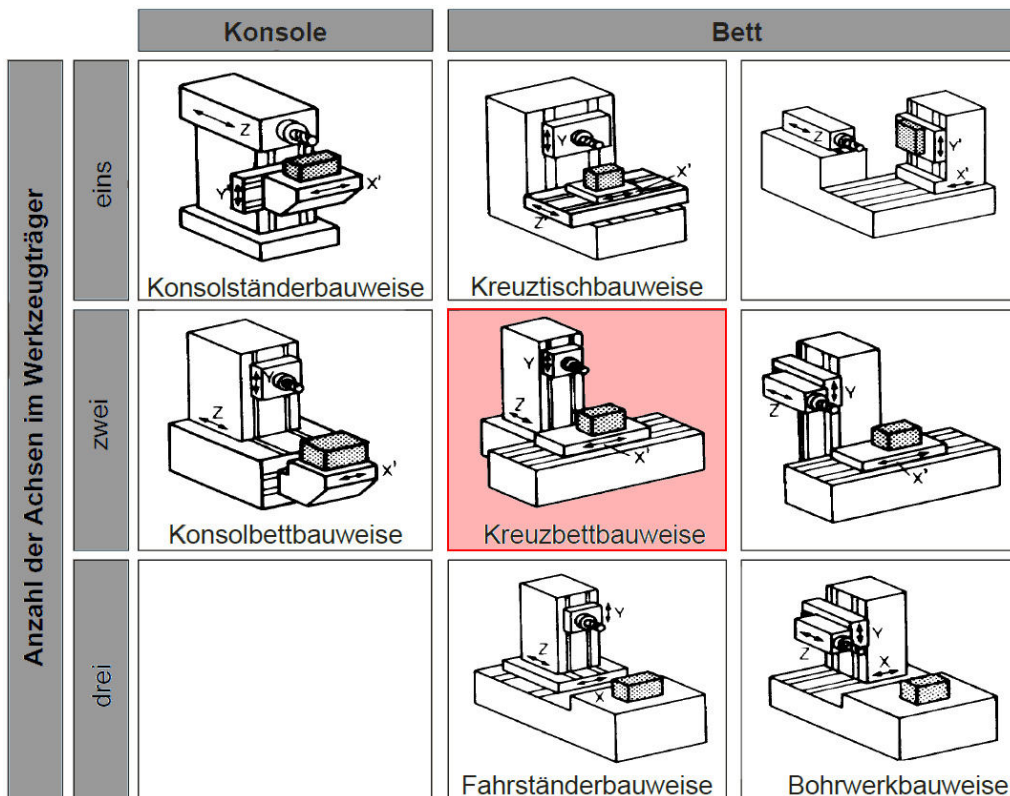


Abbildung G0.2 Gestellbauformen¹⁵⁸

¹⁵⁷ Prof. (em) Dr. Bantel, Martin: Messgeräte-Praxis; Carl Hanser Verlag München Wien, 2004, Seite 158.

¹⁵⁸ Prof. Dr. Weck, Manfred, Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, Seite 172.

A2.7 Führungsbahnschleifmaschine

Führungsbahnschleifmaschinen sind Planschleifmaschinen, in Ständer oder Portalbauweise, die höchsten Anforderungen an die geometrische Genauigkeit bei gleichzeitig großen Arbeitsraumabmessungen genügen müssen.¹⁵⁹

A2.8 Hauptsatz der Thermodynamik (1.)

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik, der sogenannte Energieerhaltungssatz wurde 1842 von Julius Mayer ausgesprochen und postulierte, dass Energieformen einfach addiert oder subtrahiert werden können, gleich, welche Energieformen vorliegen. Dieser Satz ähnelt damit dem Massenerhaltungssatz aus der technischen Mechanik.¹⁶⁰

A2.9 Innere Energie

Die innere Energie (ΔU) ist die Summe aus der Wärme (Q) und der Arbeit (W), die an einem System verrichtet wird.¹⁶¹

A2.10 Kleben der Führungsschienen

Bei der Firma BLOHM hat sich gezeigt, dass geklebte und geschraubte Führungsschienen eine größere Langzeitstabilität aufweisen als nur geschraubte. Hierfür wird der Kleber sehr dünn auf die Führungsschiene aufgebracht und diese dann verschraubt. Wird der Kleber zu dick aufgetragen, kann es zu Problemen bei der Genauigkeit kommen. Grundvoraussetzung für das Kleben ist, darauf zu achten, dass absolut staubfrei und sauber gearbeitet wird.

¹⁵⁹ Prof. Dr. Weck, Manfred, Prof. Dr. Brecher, Christian: Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005, Seite 230.

¹⁶⁰ Prof. Dr. Windisch: Thermodynamik: Ein Lehrbuch für Ingenieure; Oldenburg Wissenschaftsverlag, München, 2008.

¹⁶¹ Prof. Dr. Bošnjaković, Fran, K. F. Knoche: Technische Thermodynamik, Teil 1; Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt 1998, Seite 35.

A2.11 Körnungsangabe von Schleifpapier

Schleifpapiere gibt es mit verschiedenen Körnungsangaben. Je größer die Körnungszahl, desto feiner ist die Körnung.

Das bei BLOHM bei der Montage der Führungsbahnen verwendete Schleifpapier hat die Körnungsangabe 100–180. Laut DIN ISO 6344 liegt die Korngröße 162–82 μm . Der Unterschied ergibt sich auch der Umrechnung aus der amerikanischen Maßeinheit Mesh.

A2.12 Künstliche Alterung

„Die künstliche Alterung ist eine Wärmebehandlung zur Beschleunigung der Gefüge- und Eigenschaftsänderung und zwar entweder zum Zwecke der Stabilisierung oder einer allgemeinen Prüfung des Alterungsverhaltens.“¹⁶²

A2.13 LED (Light Emitting Diode)

„Leuchtdioden sind elektrische Bauelemente, die Licht erzeugen. Zur Lichterzeugung nutzen diese den so genannten Lumineszenzeffekt bei Halbleitern aus. Bei diesem Effekt wird Energie frei, wenn Elektronen von einem energetisch höheren Niveau auf ein niedrigeres fallen.“¹⁶³

A2.14 Messbalken

Ein aus Hartgestein bestehender Balken, dessen Oberfläche und Unterseite sowohl in der Parallelität, als auch in ihrem Bezug zueinander, mit Toleranzmaßen belegt sind.

¹⁶² Zitat: Dr. Hasse, Stephan: Gießerei-Lexikon, Schiele&Schön Verlag Berlin 2008, Seite 36.

¹⁶³ Zitat: Winkler, Peter: PC Lexikon 2005; Markt + Technik Verlag, München 2005, Seite 465.

A2.15 NPU-Reiniger

Ist ein von der BLOHM JUNG Maschinenbau GmbH verwendeter Spezialreiniger auf Basis von Isopropanol, Ethanol und n-Propanol. Hersteller ist die Helling GmbH. Der Reiniger wird, zur Entfettung von Materialien verwendet.

A2.16 O-Anordnung bei Kugelumlaufführungen

Als O-Anordnung der Kugelumlaufführungen bezeichnet die geometrische Position der Walzkörper innerhalb der Führung. Als zweite Variante gibt es noch die X-Anordnung.

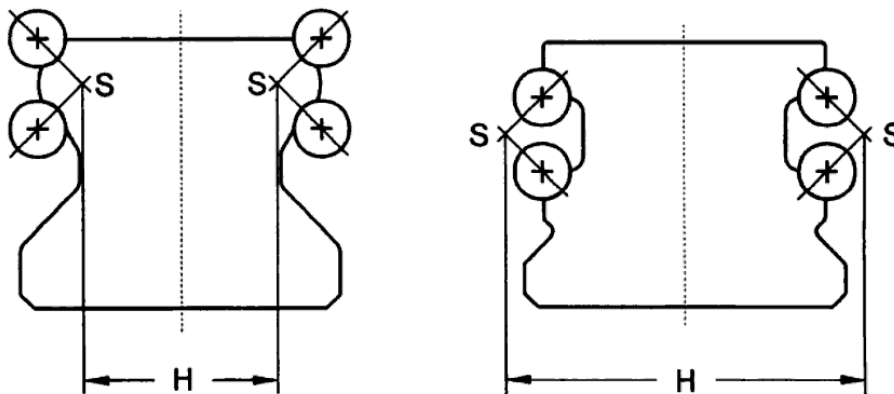


Abbildung G0.3 X- und O-Anordnung bei Profilschienenführungen¹⁶⁴

Die Abbildung G0.3 soll diesen Unterschied deutlich machen. Dieser Unterschied ab vierreihigen Linearführungen auf. Bei zweireihigen Systemen gibt es diese konstruktive Differenzierung nicht. Auf Grund der durch die Walzkörperlage bestimmten Kraftweiterleitung, ergibt sich bei der O-Anordnung eine höhere Verdrehsteifigkeit um die Längsachse. Die X-Anordnung kann jedoch, bei Zweischienensystemen mit vier Wagen, besser Höhenunterschiede ausgleichen¹⁶⁵. In der Abbildung G0.3 erkennt man diesen Zusammenhang aus dem kleineren Hebelarm H , der idealen Kräfteinleitungen. S sind deren Schnittpunkte.

¹⁶⁴ Bildquelle: Prof. Ruß, August Georg: Linearlager und Linearführungssysteme: Einsatzmöglichkeiten - Berechnung – Auslegung; Expert Verlag Renningen 2000, Seite 102.

¹⁶⁵ Prof. Ruß, August Georg: Linearlager und Linearführungssysteme: Einsatzmöglichkeiten - Berechnung – Auslegung; Expert Verlag Renningen 2000, Seite 101f.

A2.17 Planschleifen

Beim Planschleifen wird zwischen dem Umfangplanschleifen und dem Seitenplanschleifen unterschieden.¹⁶⁶ Das Werkstück wird beim Planschleifen auf den Werkzeugtisch aufgespannt. Die Schleifscheibe bewegt sich in ihrer Relativbewegung parallel zum Werkstück in Form einer Pendelbewegung. Die Bewegung in Richtung der X-Achse (Vorschub) erfolgt dabei über den angetriebenen Maschinentisch.¹⁶⁷

A2.18 Relativbewegung

Die Beschreibung einer Bewegung hängt vom gewählten Bezugssystem ab. Von einem bewegten System aus betrachtet kann eine äußere Bewegung eine Andere Geschwindigkeit haben, als von einem ruhenden. Zwei aufeinander zufahrende Autos haben beispielsweise für die Fahrer eine doppelt so hohe Geschwindigkeit wie ihre eigene.

A2.19 Setzkraft

„Die Setzkraft F_Z ist der Vorspannkraftverlust durch Setzen während der Betriebszeit.“¹⁶⁸

A2.20 Systematischer Fehler

Als systematische Fehler werden Messfehler bezeichnet, die sich bei mehreren Messungen im Mittel nicht aufheben. Eine mögliche Ursache könnte zum Beispiel ein fehlerhaft kalibriertes Messgerät sein, das immer einen zu hohen Wert anzeigt. Bei bekanntem

¹⁶⁶ Prof. Dr. Fritz, A Herbert; Prof. Dr. Schulze, Günter: Fertigungstechnik; Springer Heidelberg Dordrecht London New York 2010, Seite 332.

¹⁶⁷ Prof. Dr. Paucksch, Eberhard; Prof. Dr. Holsten, Sven; Prof. Dr. Linß, Marco; Prof. Dr. Tikal, Franz: Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien; Vieweg + Teubner Verlag, GWV Fachwerke GmbH Wiesbaden 2008.

¹⁶⁸ Zitat: Prof. Dr. Böge, Alfred: Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik; Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011, Seite I57.

linearem Zusammenhang kann ein systematischer Messfehler durch Addition oder Subtraktion korrigiert werden.¹⁶⁹

A2.21 Temperaturdatenlogger

Ein Temperaturdatenlogger ist ein Gerät, das kontinuierlich einen Temperaturverlauf aufzeichnet. Für die Diplomarbeit wurde ein Gerät der Firma Testo verwendet. Die Messdaten konnten am PC ausgewertet werden und dienten als Grundlage für Langzeittemperaturmessungen am Maschinenbett. Der Testo 175 Zweikanaldatenlogger hat eine geeichte Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

A2.22 Temperaturfühler Typ K

Die eingesetzten Temperaturfühler waren vom Typ K. Diese Thermoelemente bestehen aus einem Chromel/Alumel (NiCr/Ni) und wurden für die Temperaturmessungen benutzt.¹⁷⁰ Diese Temperaturfühler zeichnen sich durch einen sehr linearen Temperaturverlauf und hohe Genauigkeit aus. Die Verschiedenen Temperaturfühler wurden frei mit Buchstaben versehen (DIN EN 60584).¹⁷¹

A2.23 Umkehrspanne einer Messung

Die Umkehrspanne ist die größte Differenz der Anzeige eines Messgerätes bei gleichem Messwert, wenn diese Messung bei steigender oder fallender Messgröße vorgenommen. Die Ursache liegt beispielsweise am Getriebeispiel oder Reibung.¹⁷²

¹⁶⁹ Prof. (em) Dr. Bantel, Martin: Messgeräte-Praxis, Carl Hanser Verlag München Wien, 2004, Seite 29.

¹⁷⁰ Prof. Dr. Weichert, Prof. Dr. Norbert; Wülker, Michael Messtechnik und Messdatenerfassung; Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010.

¹⁷¹ Thermopaare - Teil 2: Grenzabweichungen der Thermospannungen (IEC 60584-2:1982 + A1:1989); Deutsche Fassung EN 60584-2,1993.

¹⁷² Prof. Dr. Weichert, Prof. Dr. Norbert; Wülker, Michael Messtechnik und Messdatenerfassung; Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010, Seite 11.

A2.24 Wärme

„Wärme ist Energie, die an der diathermen (wärmedurchlässigen) Grenze zwischen Systemen verschiedener Temperatur auftritt und allein aufgrund des Temperaturunterschiedes ohne Arbeitsleitung zwischen den Systemen übertragen wird.“¹⁷³

Wärme ist, vereinfacht ausgedrückt, die Bewegung von Teilchen. Jede Form der Materie besteht aus Atomen und Molekülen, die ständig in Bewegung sind und eine thermische Energie besitzen.¹⁷⁴

A2.25 Wärmeabgabe eines Menschen

Die Wärmeabgabe eines Menschen wurde im Rahmen dieser Arbeit, in Bezug auf die Messgenauigkeit untersucht. Die Tabelle G1 gibt diese in Watt an.

Tabelle G1 Wärmeabgabe eines Menschen¹⁷⁵

Art der körperlichen Tätigkeit	Aktivitätsstufe	Wärmeabgabe in W
Angelehnt	1	100
Sitzend, entspannt		
Stehend, entspannt		
Sitzende Tätigkeit		
Stehende Tätigkeit (z.B. leichte Industriearbeit)	2	200
Stehende Tätigkeit (z.B. Maschinenbedienung)	3	300
Mittelschwere Tätigkeit (z.B. schwere Maschinen, Werkstattarbeit)	4	400

¹⁷³ Prof. Dr. Marek, Rudi, Prof. Dr. Nitsche, Klaus: Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen, Anwendungen, Übungsaufgaben; Carl Hanser Verlag München, 2007, Seite 16.

¹⁷⁴ Prof. Dr. Harten, Ulrich: Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, Seite 160.

¹⁷⁵ Nach DIN ISO 7730 und Aktivitätsstufen nach DIN 1946/2.

A3 Daten zur Analyse der Formabweichungen

Die Tabellen A3.1 bis A3.8 stellen Zusammenfassungen der Messergebnisse an zwanzig PLANOMAT-Schleifmaschinen dar. Diese Daten dienen der quantitativen und qualitativen Bewertung der Führungsfehler an den einzelnen Maschinenachsen. Fett markiert sind jeweils die gemessenen Maximas.

Tabelle A3.1 Abweichungen des Maschinenbettes an der X- und Y-Achse, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage






















		Abweichungen des Maschinenbettes				
		X			Y	
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
Typ	Nummer	längs	quer	Form	längs	quer
PL408	2077	1,41	1,52		n.v.	n.v.
PL408	2303	1,22	1,60		2,65	3,32
PL408	2645	1,64	2,20		1,12	2,18
PL408	2647	1,05	7,16		1,54	2,60
PL408	8017564	4,70	4,86		1,68	2,33
PL408	2089	1,66	1,89		1,24	2,74
PL408	2385	2,42	2,74		2,58	3,65
PL412	1771	9,33	10,18		1,37	1,59
PL412	2316	3,48	3,65		n.v.	n.v.
PL412	2317	n.v.	n.v.		n.v.	n.v.
PL412	2318	4,60	5,06		0,75	1,30
PL412	2319	6,20	6,25		1,75	2,37
PL412	2374	0,74	8,00		0,77	1,22
PL608	2130	2,03	2,65		3,19	3,32
PL608	2150	3,42	4,28		1,32	3,30
PL608	2127	2,81	3,18		0,13	0,92
PL612	2030	2,32	3,20		n.v.	n.v.
PL612	2031	11,84	12,49		0,80	1,39
PL612	2049	7,74	8,98		1,69	4,22
PL612	2063	2,13	2,55		n.v.	n.v.
PL612	1563	2,13	2,55		1,69	4,22

Tabelle A3.2 Abweichungen des Maschinenbettes an der Z-Achse in Y-Richtig, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage

Typ	Nummer	Abweichungen des Maschinenbettes		
		Z1	Z2	maximal
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
		Y	Y	Y
PL408	2077	1,31	1,00	8,84
PL408	2303	1,64	0,87	0,26
PL408	2645	0,38	0,76	0,73
PL408	2647	0,61	0,46	0,65
PL408	8017564	0,78	1,07	5,81
PL408	2089	0,45	1,39	3,54
PL408	2385	0,46	3,70	6,27
PL412	1771	1,24	0,77	1,88
PL412	2316	0,39	0,80	5,06
PL412	2317	0,39	1,31	3,68
PL412	2318	0,45	1,02	6,17
PL412	2319	n.v.	n.v.	n.v.
PL412	2374	1,22	0,48	0,17
PL608	2130	2,40	1,74	1,07
PL608	2150	1,78	0,37	n.v.
PL608	2127	3,66	1,58	5,64
PL612	2030	1,49	2,03	1,86
PL612	2031	3,80	2,09	3,37
PL612	2049	2,45	3,50	4,03
PL612	2063	1,27	1,81	2,56
PL612	1563	n.v.	n.v.	n.v.

Tabelle A3.3 Abweichungen der X-Achse, längs und quer, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage mit Hilfe der Prüfplatte



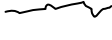

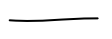


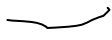
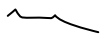



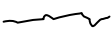


		Neigungswaage mit P.- Platte		
		X-Achse		
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
Typ	Nummer	längs	quer	Spalte
PL408	2077	1,98	2,29	
PL408	2303	1,63	1,70	
PL408	2645	1,29	2,33	
PL408	2647	1,81	1,89	
PL408	8017564	1,98	2,94	
PL408	2089	1,50	2,55	
PL408	2385	1,41	1,84	
PL412	1771	5,36	5,32	
PL412	2316	2,15	2,28	
PL412	2317	1,28	2,83	
PL412	2318	2,52	2,70	
PL412	2319	0,87	1,23	
PL412	2374	1,51	2,65	
PL608	2130	1,71	1,84	
PL608	2150	1,98	2,49	
PL608	2127	3,04	3,95	
PL612	2030	2,69	3,33	
PL612	2031	2,42	3,06	
PL612	2049	2,24	3,33	
PL612	2063	4,63	3,93	
PL612	1563	4,63	3,93	

Tabelle A3.4 Abweichung des Winkels der X-Achse in Y-Richtung

		α vor	α end
		X/Y	X/Y
Typ	Nummer	Winkel [°]	Winkel [°]
PL408	2077	5,00	n.v.
PL408	2303	3,00	n.v.
PL408	2645	8,00	10,00
PL408	2647	n.v.	n.v.
PL408	8017564	11,00	n.v.
PL408	2089		n.v.
PL408	2385	4,00	n.v.
PL412	1771	n.v.	n.v.
PL412	2316	n.v.	n.v.
PL412	2317	n.v.	n.v.
PL412	2318	n.v.	n.v.
PL412	2319	n.v.	n.v.
PL412	2374	n.v.	n.v.
PL608	2130	5,00	n.v.
PL608	2150	n.v.	n.v.
PL608	2127	5,00	n.v.
PL612	2030	n.v.	n.v.
PL612	2031	3,00	12,00
PL612	2049	4,00	n.v.
PL612	2063	n.v.	n.v.
PL612	1563	n.v.	n.v.

Tabelle A3.5 Abweichung des Winkels der Y-Achse, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage

Typ	Nummer	Winkelmessung	
		Y-Achse	
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
		längs	quer
PL408	2077	20,00	20,00
PL408	2303	10,00	10,00
PL408	2645	10,00	10,00
PL408	2647	20,00	10,00
PL408	8017564	15,00	10,00
PL408	2089	10,00	10,00
PL408	2385	15,00	10,00
PL412	1771	10,00	10,00
PL412	2316	10,00	10,00
PL412	2317	10,00	10,00
PL412	2318	10,00	10,00
PL412	2319	10,00	10,00
PL412	2374	10,00	10,00
PL608	2130	10,00	10,00
PL608	2150	10,00	10,00
PL608	2127	10,00	10,00
PL612	2030	10,00	15,00
PL612	2031	10,00	10,00
PL612	2049	10,00	10,00
PL612	2063	10,00	10,00
PL612	1563	n.v.	n.v.

Tabelle A3.6 Abweichung der Y-Achse in X- und Z-Richtung, gemessen mit dem Autokollimationsfernrohr

Typ	Nummer	Autokollimationsmessung			
		Y (links)		Y (rechts)	
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
		X	Z	X	Z
PL408	2077	5,914	3,879	6,017	3,498
PL408	2303	3,652	7,630	6,299	7,882
PL408	2645	5,971	2,626	9,097	3,330
PL408	2647	4,774	6,503	4,923	2,741
PL408	8017564	7,123	4,635	4,597	3,218
PL408	2089	7,542	3,555	8,557	3,594
PL408	2385	2,692	6,250	6,062	5,039
PL412	1771	6,580	2,918	6,308	3,242
PL412	2316	6,744	5,296	8,038	1,830
PL412	2317	4,678	4,821	7,527	4,759
PL412	2318	7,681	3,454	4,421	1,635
PL412	2319	3,070	1,797	4,030	2,722
PL412	2374	5,150	3,357	6,035	3,038
PL608	2130	6,026	4,230	4,487	3,073
PL608	2150	7,746	0,664	8,003	2,908
PL608	2127	4,711	2,023	7,160	3,099
PL612	2030	4,452	0,795	6,972	3,488
PL612	2031	6,003	2,892	3,454	3,100
PL612	2049	5,823	3,791	7,750	4,447
PL612	2063	5,432	4,376	5,683	2,636
PL612	1563	5,432	4,376	5,683	2,636

Tabelle A3.7 Abweichung der Z-Achse in X- und Y-Richtung, gemessen mit dem Autokollimationsfernrohr

Typ	Nummer	Autokollimationsmessung			
		Z-Schiene (links)		Z-Schiene (rechts)	
		[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]	[$\mu\text{m} / \text{m}$]
		X	Y	X	Y
PL408	2077	2,630	2,027	2,181	1,425
PL408	2303	1,824	3,079	1,873	3,847
PL408	2645	4,115	3,466	5,030	6,818
PL408	2647	2,814	7,001	2,955	10,155
PL408	8017564	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
PL408	2089	3,036	2,446	2,303	1,002
PL408	2385	2,460	0,784	1,028	3,764
PL412	1771	4,247	2,562	1,977	2,806
PL412	2316	2,626	3,840	2,714	2,095
PL412	2317	8,720	1,146	1,613	3,997
PL412	2318	5,093	2,171	3,941	5,291
PL412	2319	4,967	3,498	1,037	1,694
PL412	2374	2,764	2,829	3,228	5,517
PL608	2130	5,274	4,567	9,588	4,008
PL608	2150	4,426	2,712	5,432	2,682
PL608	2127	8,730	5,219	5,567	17,110
PL612	2030	1,485	2,859	5,079	3,403
PL612	2031	6,815	5,456	7,120	7,055
PL612	2049	6,639	5,197	3,284	1,349
PL612	2063	4,434	2,899	2,107	1,639
PL612	1563	4,434	2,899	2,107	1,639

Tabelle A3.8 Abweichung der Z-Achse in Y-Richtung

		Messung mit Messbalken und Messtaster
		Z-Achse
		[μm]
Typ	Nummer	Y-Richtung
PL408	2077	2,8
PL408	2303	2,5
PL408	2645	2,3
PL408	2647	3,0
PL408	8017564	3,5
PL408	2089	2,7
PL408	2385	2,6
PL412	1771	3,0
PL412	2316	2,5
PL412	2317	2,5
PL412	2318	3,0
PL412	2319	3,0
PL412	2374	2,3
PL608	2130	3,6
PL608	2150	2,8
PL608	2127	3,4
PL612	2030	3,6
PL612	2031	2,8
PL612	2049	1,4
PL612	2063	2,5
PL612	1563	2,5

A4 CD

Auf der angefügten CD befinden sich vier Dateien. Einige Tabellen enthalten Visual Basic Skripte. Diese sollen den Funktionsumfang von Excel erweitern und eine bessere Auswertbarkeit der Messergebnisse ermöglichen.

Analyse_Maschinentoleranzen.xls

Zusammengefasste Daten fertiger Maschinen mit statistischer Auswertung. Diese Daten dienen als Grundlage zur Bewertung des Fehlereinflusses einzelner Achsen auf den Gesamtfehler.

Auswertung_v16.xls

Diese Datei enthält die aufgenommenen Temperaturverläufe und die Auswertung der einzelnen Ausschnitte.

Balkenmessung_Diagramme.doc

Die Messdaten der Balkenmessung zur Kontrolle des Messverfahrens mit der elektronischen Neigungsmesswaage.

Ende-Anfang-Transformation.xls

Eine Exceltabelle zur automatischen Ausrichtung der Messdiagramme bei der Balkenmessung.

MCVS1214 Kalt.csv

Eine Beispieldatei, zur automatischen Importierung.

wyler-verfahren.xls

Eine Exceltabelle, in der die Berechnungen der Ausrichtungsverfahren nachvollzogen wurden.

A5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	PLANOMAT-Schleifmaschine (Foto).....	11
Abbildung 1.2	Ereignisgesteuerte Prozesskette der Nacharbeit	14
Abbildung 1.3	PLANOMAT-Schleifmaschine mit durchsichtigem Aufbau und Koordinatensystem	18
Abbildung 1.4:	PLANOMAT Schleifmaschine Aufbau des Maschinenbettes mit Spindelträger, Linearführungen und Werkzeugmaschinentisch	19
Abbildung 1.5	Maschinenbett mit fertig montierter Linearführung	20
Abbildung 1.6	Aufbau der Profilschienenwalzführung	21
Abbildung 1.7	Vergleich der statischen Nachgiebigkeiten verschiedener Profilschienenwalzführungen unter Druck- und Zugbelastung	22
Abbildung 1.8	Geradheitstoleranz	23
Abbildung 1.9	Ebenheitstoleranz	24
Abbildung 3.1	Ansicht des Neigungsmessgerätes BlueLEVEL von Wyler	25
Abbildung 3.2	Prinzipbild eines Neigungsmessgerätes (Quelle: Firma Wyler, Schweiz).....	26
Abbildung 3.3	Verdeutlichung des geometrischen Zusammenhangs der Einzelmessungen.....	27
Abbildung 3.4	Problematik des systematischen Fehlers.....	28
Abbildung 3.5	Modell zur Berechnung eines Profilbildes.....	28
Abbildung 3.6	Modell der Twistmessung.....	29
Abbildung 3.7	Ausdruck der Software LEVELSOFT PRO von Firma Wyler.....	30
Abbildung 3.8	Ausrichtung nach Endpunkten	32
Abbildung 3.9	Ausrichtung nach Endpunkten – Verfahren.....	33
Abbildung 3.10	Ausrichtung nach ISO 1101	34
Abbildung 3.11	Methode der linearen Regression.....	35
Abbildung 3.12	Messfehler durch Temperaturdrift	37
Abbildung 3.13	Schwingungen an der Führungsbahn, rechts außen	39
Abbildung 3.14	Schwingungen an der Führungsbahn, Mitte	39
Abbildung 3.15	Aufbau des Autokollimationsverfahrens	41
Abbildung 3.16	Funktionsweise der CCD-Matrix des Autokollimationsfernrohrs	42
Abbildung 3.17	Aufbau eines Messtasters.....	43
Abbildung 3.18	Aufbau zur Messung der Geradheitsabweichung einer Linearführung	45
Abbildung 3.19	Geradheitsreflektor und Geradheitsinterferometer der Firma Renishaw	46
Abbildung 3.20	Prinzipieller Aufbau mit einem Renishaw-Messsystem	47
Abbildung 3.21	Geradheitsmesseinrichtung des Herstellers Renishaw.....	47
Abbildung 3.22	Versuchsaufbau zur Überprüfung der Messgenauigkeit des Laserinterferometersystems mit ortsfestem Maschinentisch.....	49

Abbildung 4.1	Aufbau und Funktionsweise der Montagevorrichtung	53
Abbildung 4.2	Maschinenbett mit Prüfpatte an der X-Achse	55
Abbildung 4.3	Prinzipskizze der Fixiereinrichtung zur Montage der Z-Führungsschienen	57
Abbildung 4.4	Linke Seite der Fixiervorrichtung	57
Abbildung 4.5	Messaufbau der Z-Achse, Aufbau mit Messbalken und Messtaster..	59
Abbildung 4.6	Bestimmung des Messfehlers	62
Abbildung 4.7	Umrechnung Steigung in Grad	62
Abbildung 5.1	Einfluss der manuellen Führung	65
Abbildung 5.2	Anwendung des Strahlensatzes auf die Toleranz.....	66
Abbildung 5.3	Wiederholungsmessung 1	68
Abbildung 5.4	Wiederholungsmessung 2	69
Abbildung 5.5	quantitativer Größenvergleich der Prüfplatte zum Schleifmaschinentisch.....	70
Abbildung 5.6	statisch bestimmte Prüfplatte	71
Abbildung 5.7	Vergleich des Abstandes der Prüfplatte und dem des Maschinentisches	72
Abbildung 5.8	Bestimmung der optimalen Prüfplattenlänge.....	72
Abbildung 5.9	Problematik nicht erfasster Bereiche bei der Messung mit der elektronischen Neigungsmesswaage.....	76
Abbildung 5.10	Aufbau einer Vergleichsmessung	77
Abbildung 5.11	Ausrichtung des Graphen.....	79
Abbildung 5.12	Darstellung zweier Graphen zur Überprüfung des Messverfahrens ..	80
Abbildung 5.13	Vergleich der Messergebnisse des Messtasters mit denen der elektronischen Neigungswaage.....	81
Abbildung 6.1	Einzelabweichungen auf die Gesamtabweichung.....	84
Abbildung 6.2	Aufbau eines Kugelumlaufführungswagens mit Führungsschiene....	86
Abbildung 6.3	Transport der Maschinenbetten.....	87
Abbildung 6.4	Prinzip des Setzens an der Linearführung	88
Abbildung 6.5	Auswirkung einer extremen Formabweichung im Randbereich der X-Achse auf ein kleines Werkstück.....	90
Abbildung 6.6	Vereinfachte Darstellung des Einflusses von Führungsfehlern ohne Einfluss auf das Werkstück.....	90
Abbildung 6.7	große Abweichung in einem Bereich.....	91
Abbildung 6.8	Minimal- und Maximalabweichung der Führung in zwei voneinander getrennten Bereichen.....	91
Abbildung 6.9	Minimal- und Maximalabweichung in verschiedenen Bereichen, mit Einfluss aufeinander	92
Abbildung 7.1	Geradheitsmessung der X-Achse mit Twist, gemessen um 7:45 Uhr	94
Abbildung 7.2	Geradheitsmessung der X-Achse mit Twist, gemessen um 14:00 Uhr	94
Abbildung 7.3	Temperaturverlauf als Funktion der Zeit bei Erwärmung eines idealen thermischen Systems (qualitativ)	101

Abbildung 7.4	Schematische Darstellung der Temperaturunterschiede am Maschinenbett (morgens).....	103
Abbildung 7.5	Prinzipielle Formänderung durch Temperaturerhöhung.....	104
Abbildung 7.6	Prinzip Darstellung eines thermisch verformten Maschinenbettes einer PLANOMAT-Schleifmaschine bei Temperaturerhöhung.....	104
Abbildung 7.7	Wahl der Messpunkte, Draufsicht.....	107
Abbildung 7.8	zeitlicher Verlauf der Temperaturen.....	108
Abbildung 7.9	Modell der Temperatureinflüsse in der Montagehalle.....	109
Abbildung 7.10	schematische Aufteilung der Montagehalle 14.....	110
Abbildung 7.11	Einfluss einer geöffneten Tür Pos. 1 in Abbildung 7.10 (Temperaturverlauf vom 2.06.11).....	112
Abbildung 7.12	Einfluss der Außentemperatur (2.06.11).....	113
Abbildung 7.13	Temperaturverlauf einer gesamten Woche.....	114
Abbildung 7.14	Temperaturverlauf an einem arbeitsfreien Tag (12.06.2011 Pfingstsonntag).....	115
Abbildung 7.15	Verdeutlichung des Einfluss der Außentemperatur auf die Hallentemperatur.....	116
Abbildung 7.16	Temperatur am Maschinenbett an einem Tag ohne große Außentemperaturdifferenz.....	117
Abbildung 7.17	Temperatur am Maschinenbett an einem Tag mit großer Außentemperaturdifferenz.....	118
Abbildung 7.18	Prinzipskizze des Aufbaus mit drei Gebläsen.....	120
Abbildung 7.19	Prinzipskizze des Aufbaus mit einem Gebläse.....	121
Abbildung 7.20	Temperaturverlauf mit starkem Gebläse.....	122
Abbildung 7.21	an der Front abgedichtetes Maschinenbett.....	123
Abbildung 7.22	Einsatz des starken Gebläses unter Abdichtung der Front.....	123
Abbildung 7.23	einfaches Gebläse mit abgedichteter Front.....	124
Abbildung 8.1	Modell eines Gebläses mit magnetischen Anschlussplatten.....	131
Abbildung E0.1	Excel Tabelle mit Visual Basic Erweiterung.....	140
Abbildung E0.2	Protokoll der Excel Tabelle.....	141
Abbildung G0.1	Abbildung eines CCD-Sensors.....	142
Abbildung G0.2	Gestellbauformen.....	144
Abbildung G0.3	X- und O-Anordnung bei Profilschienenführungen.....	147

A6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Verschiedene Versionen der PLANOMAT in der Übersicht	12
Tabelle 3.1	Genauigkeit des Renishaw Laser Interferometer Systems	48
Tabelle 5.1	Vor- und Nachteile der Geradheitsmessung mit dem Messtaster	83
Tabelle 6.1	Bewertung der Formfehler am Werkstück in Bezug auf die Geradheitsabweichungen der Achsen	93
Tabelle 7.1	Mittlere spezifische Wärmekapazitäten c_m	99
Tabelle 7.2	halleninterne thermische Einflüsse	111
Tabelle 8.1	Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle	127
Tabelle 8.2	Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle	128
Tabelle 8.3	Vor- und Nachteile der Klimatisierung der Montagehalle	129
Tabelle 8.4	Vor- und Nachteile eines Gebläses	132
Tabelle 8.5	Vor- und Nachteile der Einführung eines qualitätssichernden Schrittes.....	133
Tabelle G1	Wärmeabgabe eines Menschen.....	150
Tabelle A3.1	Abweichungen des Maschinenbettes an der X- und Y-Achse, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage.....	152
Tabelle A3.2	Abweichungen des Maschinenbettes an der Z-Achse in Y- Richtung, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage.....	153
Tabelle A3.3	Abweichungen der X-Achse, längs und quer, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage mit Hilfe der Prüfplatte	154
Tabelle A3.4	Abweichung des Winkels der X-Achse in Y-Richtung	155
Tabelle A3.5	Abweichung des Winkels der Y-Achse, gemessen mit der elektronischen Neigungswaage.....	156
Tabelle A3.6	Abweichung der Y-Achse in X-und Z-Richtung, gemessen mit dem Autokollimationsfernrohr.....	157
Tabelle A3.7	Abweichung der Z-Achse in X- und Y-Richtung, gemessen mit dem Autokollimationsfernrohr.....	158
Tabelle A3.8	Abweichung der Z-Achse in Y-Richtung	159