

## FVA-Richtlinie


# Oberflächen/Drall – Wellendichtungen

Erarbeitung einer FVA Richtlinie mit Oberflächen- und Drallanforderungen an Dichtungslauflächen für Wellendichtungen

Forschungsvorhaben Nr. 975 I  
V3 - 2026

Abschluss-  
bericht

Herausgabe: 24.04.2026

<b>FVA 975 I</b>	<b>FVA-RICHTLINIE: OBERFLÄCHEN/DRALL – WELLENDICHTUNGEN V3</b>	 sharing drive innovation
------------------	--	---

FVA Richtlinie Oberflächen/Drall – Wellendichtungen

**Thema: Erarbeitung einer FVA Richtlinie mit Oberflächen- und Drallanforderungen an Dichtungslauflächen für Wellendichtungen**

## Summary:

Die FVA-Richtlinie „Oberflächen/Drall – Wellendichtungen“ präsentiert eine kompakte Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands zur Oberflächenbeschaffenheit von im Einstich geschliffenen Dichtungsgegenauflächen von Radial-Wellendichtringen. Die Richtlinie legt den Fokus auf die Darstellung von Methoden zur Messung, Charakterisierung und Bewertung von Drall. Der Begriff Drall bezeichnet alle Arten von mikroskopischen und makroskopischen Oberflächenstrukturen auf der Wellenoberfläche, welche bei Rotation der Welle im Dichtkontakt aktiv Fluid fördern und zum Ausfall des Dichtsystems führen können.

Die FVA-Richtlinie dient als umfassender Leitfaden zur Analyse der Oberflächenbeschaffenheit einer Dichtungsgegenaufläche, der es Unternehmen ermöglicht, Dichtungsgegenauflächen eigenständig sowie in Zusammenarbeit mit Zulieferern und Kunden korrekt zu beurteilen, ohne auf externe Expertise angewiesen zu sein.

*Anwendungsbereich:* Dichtungsgegenauflächen für Radial-Wellendichtringe im Bereich Maschinenbau/Antriebstechnik nach DIN 3760/3761, die mit dem Bearbeitungsverfahren Außenrundscheifen im Einstechverfahren hergestellt werden.

©FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.. Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der FVA Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., gestattet.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Anwendungsbereich.....	5
3	Normative Verweisungen .....	6
4	Begriffe .....	6
5	Oberflächenbeschaffenheit der Dichtungsgegenauflä-chen – Grundlagen .....	9
5.1	Bearbeitungsverfahren.....	9
5.2	Gestaltabweichungen der Dichtungsgegenauflä-che.....	9
5.2.1	Form und Welligkeit der Dichtungsgegenauflä-che .....	9
5.2.2	Oberflächenrauheit der Dichtungsgegenauflä-che .....	9
5.3	Drall – Grundlagen und Definitionen.....	10
6	Messmethoden für Gestaltabweichungen.....	12
6.1	R-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenauflä-che .....	12
6.1.1	Maximale Höhe des Rauheitsprofils .....	12
6.1.2	Arithmetischer Mittelwert des Rauheitsprofils.....	12
6.1.3	Maximale Höhe je Abschnitt des Rauheitsprofils .....	13
6.2	W-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenauflä-che.....	13
6.2.1	Gesamthöhe des Welligkeitsprofils .....	13
6.3	S-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenauflä-che.....	13
6.3.1	Maximale Höhe.....	13
6.3.2	Arithmetischer Mittelwert der Höhe .....	13
6.4	Formabweichungen der Dichtungsgegenauflä-che.....	13
6.5	Beschädigungen der Dichtungsgegenauflä-che .....	13
7	Messmethoden für Drall .....	14
7.1	Strukturbasierte Mikrodrall Analyse .....	15
7.1.1	Winkelverteilungskurve und Winkelvolumenverteilungskurve.....	15
7.1.2	Medianwinkel der Mikrodrall-Winkelverteilung .....	16
7.1.3	Medianwinkel der Mikrodrall-Winkelvolumenverteilung.....	16
7.1.4	Standardabweichung der Mikrodrall-Winkelverteilung .....	17

7.1.5	Arithmetisch gemittelte Mikrodralltiefe .....	17
7.1.6	Prozentualer Anteil der links- und rechtsorientierten Mikrodrallstrukturen .....	17
7.1.7	Prozentualer Anteil des links- und rechtsorientierten Strukturvolumens .....	17
7.1.8	Anzahl Mikrodrallstrukturen pro Quadratmillimeter .....	17
7.2	Strukturbasierte Makrodrall Analyse .....	18
7.2.1	Median der Strukturwinkel .....	18
7.2.2	Standardabweichung der Strukturwinkel .....	18
7.2.3	Mittelwert der Strukturbreiten .....	18
7.2.4	Standardabweichung der Strukturbreiten .....	19
7.2.5	Variationskoeffizient der Strukturbreiten.....	19
7.2.6	Mittelwert der Strukturturen .....	19
7.2.7	Mittlere Strukturlänge normiert auf die Messfeldlänge .....	19
7.2.8	Strukturwinkelverteilung.....	20
7.2.9	Strukturbreitenverteilung.....	21
7.3	Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 .....	22
7.3.1	Drallwinkel .....	22
7.3.2	Periodenlänge.....	22
7.3.3	Dralltiefe.....	22
7.3.4	Gängigkeit.....	22
7.3.5	Theoretischer Förderquerschnitt .....	23
7.4	Dominante Welligkeit nach VDA 2007 .....	23
7.4.1	Horizontale Welligkeit .....	23
7.4.2	Gesamthöhe des Profils .....	23
7.4.3	Mittlere Höhe der Profilelemente .....	23
7.5	Drallprüfung mit der Fadenmethode .....	24
7.5.1	Durchführung der Fadenmethode .....	24
7.5.2	Auswertung der Fadenmethode .....	25
7.5.3	Kenngößen der Fadenmethode .....	25
7.6	Drallprüfung mit dem Streulichtverfahren .....	26
7.6.1	Kenngößen des Streulichtverfahrens .....	26

---

8	Vorgehen bei der Analyse einer Dichtungsgegenlauffläche .....	26
9	Beispielhafte Zeichnungseintragungen .....	28
9.1	Beispielhafte Zeichnungseintragungen zu Rauheit und Welligkeit nach DIN EN ISO 21920 .....	28
9.2	Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur strukturbasierten Mikrodrall Analyse .....	29
9.3	Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur strukturbasierten Makrodrall Analyse .....	29
9.4	Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7..	30
	Literaturangaben .....	31
	Anhang .....	33

# 1 Einleitung

Die Oberflächenbeschaffenheit der Dichtungsgegenaufläche von Radial-Wellendichtungen beeinflusst maßgeblich die Dichtfunktion einer Radial-Wellendichtung, siehe Abbildung 1. Hierbei sind das Bearbeitungsverfahren, Gestaltabweichungen (Form, Welligkeit und Rauheit), Oberflächenunvollkommenheiten (Kratzer, Dellen, Rost) der Wellenoberfläche sowie Drall zu beachten. Jedes dieser Themen für sich genommen kann zu einer schädlichen Beeinträchtigung eines Dichtsystems führen, wodurch Leckagen oder Systemausfälle verursacht werden, was letztlich die Zuverlässigkeit von Produkten beeinträchtigt.

Das Ziel dieser Richtlinie ist es, den aktuellen Kenntnisstand zum Themenkomplex „Drall auf der Dichtungsgegenaufläche“ zusammenzufassen und durch Begriffsdefinitionen einen allgemein anwendbaren Sprachgebrauch herzustellen. Zudem werden aktuell verfügbare Messmethoden und -verfahren dargestellt und durch Empfehlungen und Vorgaben Hinweise für die Auslegung zuverlässiger Radial-Wellendichtsysteme gegeben. Durch die Etablierung einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Messung, Auswertung und Beurteilung von Dichtungsgegenauflachen soll eine Grundlage für die Qualitätssicherung der entsprechenden Produkte geschaffen werden.

Abbildung 1 zeigt den Inhalt der Richtlinie mit dem Schwerpunkt auf dem Thema Drall. Außerdem werden im Zuge der Richtlinie weitere relevante Oberflächeneigenschaften der Dichtungsgegenaufläche in Kurzform erläutert, die bereits in Normen und Richtlinien enthalten sind.

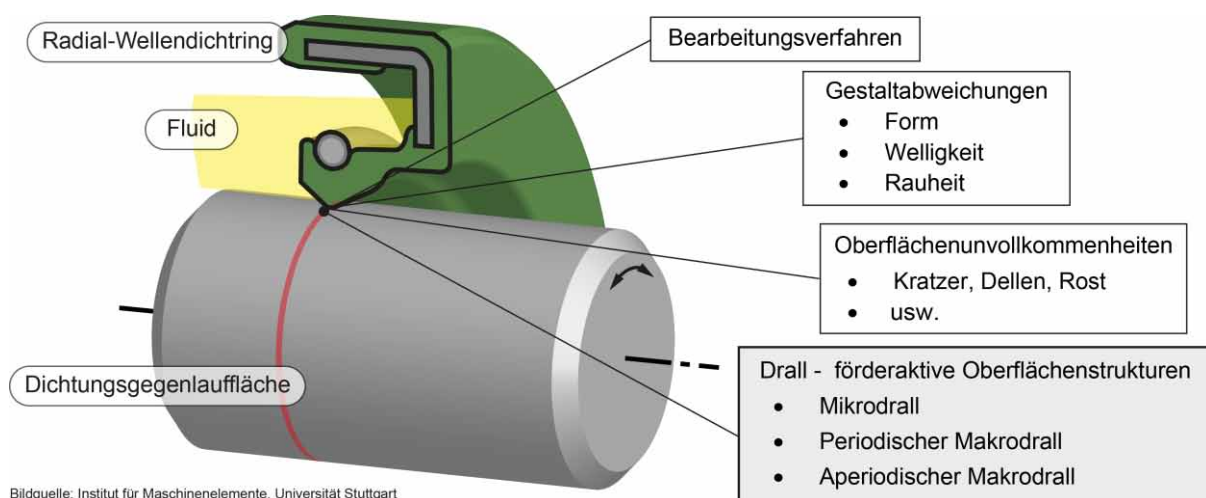


Abbildung 1: Inhalt der FVA Richtlinie 975 I „Oberflächen/Drall – Wellendichtungen“

## 2 Anwendungsbereich

Die FVA Richtlinie „Oberflächen/Drall – Wellendichtungen“ gilt für Dichtungsgegenauflachen für Radial-Wellendichtungen im Bereich Maschinenbau/Antriebstechnik nach DIN 3760/3761 [1, 2], die mit dem Bearbeitungsverfahren Auenrundscheifen im Einstechverfahren hergestellt werden. Alle angegebenen Toleranzbereiche stellen Empfehlungen dar und sind nicht als absolut strikte Grenzwerte aufzufassen. Da diese sehr

stark anwendungsabhängig sind, müssen in aller Regel individuell und applikations-spezifisch Grenzen ergründet oder abgestimmt werden.

### 3 Normative Verweisungen

DIN 3760 [1]	Radial-Wellendichtringe
DIN 3761 [2]	Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge
DIN 4760 [3]	Gestaltabweichungen
DIN EN ISO 21920-1-3 [4–6]	Oberflächenbeschaffenheit: Profile
DIN EN ISO 25178-1-3 [7–9]	Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft
DIN EN ISO 8785 [10]	Oberflächenunvollkommenheiten
DIN EN ISO 3274 [11]	Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren
DIN EN ISO 16610-1 [12]	Filterung – Überblick und grundlegende Konzepte
MBN 31007-7 [13]	Oberflächenbeschaffenheit: Mess- und Auswertverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtflächen
VDA 2006 [14]	Oberflächenbeschaffenheit: Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
VDA 2007 [15]	Oberflächenbeschaffenheit: Definitionen und Kenngrößen der dominanten Welligkeit
RMA OS-1-1 [16]	Shaft Finish Requirements for Radial Lip Seals

### 4 Begriffe

#### Dichtungsgegenlauffläche

Die Dichtungsgegenlauffläche ist der Bereich der Wellenoberfläche, der mit der Dichtkante des Radial-Wellendichtrings in tribologischem Kontakt steht.

#### Oberflächenbearbeitungsverfahren

Das Oberflächenbearbeitungsverfahren ist der finale Produktionsschritt bei der Herstellung der Dichtungsgegenlauffläche. In aller Regel entstehen durch Materialabtrag spezifische Formen (Rundheit, Geradheit) und Oberflächenbeschaffenheiten (Rauheit, Drallfreiheit) der Wellenoberfläche.

## **Drall**

Drall bezeichnet Oberflächenstrukturen der Dichtungsgegenlauffläche, die im dynamischen Betrieb der Radial-Wellendichtung die Strömung im Dichtspalt in axialer Richtung umlenken. Dadurch werden die tribologischen Verhältnisse im Dichtkontakt beeinflusst. Drall kann ursächlich für Leckagen und Schäden am Dichtsystem sein. Es existieren unterschiedliche Kategorien von Drall, die auf der Dichtungsgegenlauffläche überlagert auftreten können.

### **Mikrodrall**

Mikrodrall beschreibt förderaktive Schleifriefen, die stochastisch auf der Dichtungsgegenlauffläche verteilt sind. Sie entstehen durch den Korneingriff einzelner Schleifkörner während des Schleifprozesses und bilden die Feinstruktur der Dichtungsgegenlauffläche.

### **Makrodrall**

Makrodrall beschreibt förderaktive periodische oder aperiodische Strukturen auf der Dichtungsgegenlauffläche. Diese resultieren aus einem kinematischen Abbildungsprozess der Schleifscheibenoberfläche auf die Wellenoberfläche während des Schleifprozesses und bilden die Grobstruktur der Dichtungsgegenlauffläche.

## **Oberflächenunvollkommenheiten**

Oberflächenunvollkommenheiten sind nach DIN EN ISO 8785 [10] definiert und umfassen beispielsweise Kratzer, Dellen oder Grate. Oberflächenunvollkommenheiten können die Funktion einer Radial-Wellendichtung auf mehrere Weisen beeinflussen, beispielsweise durch einen stark erhöhten Verschleiß der Dichtkante oder axiale Ölförderung im Dichtspalt. Die Folge können dynamische als auch statische Undichtheit sein.

## **Gestaltabweichungen**

Gestaltabweichungen nach DIN 4760 [3] beschreiben und klassifizieren die Abweichungen der Ist-Oberfläche von der Soll-Oberfläche.

## **Drallmessung**

Die Drallmessung umfasst Verfahren zur Messung und Bewertung von Drall auf Dichtungsgegenlaufflächen. Dabei wird zwischen der Mikrodrallmessung und der Makrodrallmessung unterschieden.

## **Strukturbasierte Drallanalyse**

Strukturbasierte Analyseverfahren identifizieren, lokalisieren und analysieren einzelne Strukturelemente (Schleifriefen und Schleifstrukturen) in den Messdaten von Wellenoberflächen und bewerten diese in der Summe statistisch. Die strukturbasierte Drallanalyse basiert auf 3D-Topographiedaten, die üblicherweise mit optischen Oberflächenmessgeräten erfasst werden.

## Qualitative Prüfverfahren

Qualitative Prüfverfahren sind Verfahren zur Beschreibung und Bewertung von Eigenschaften oder Merkmalen eines Phänomens ohne quantitative Werte. Das Ergebnis ist ein binäres Entscheidungsmerkmal (ja/nein).

## Quantitative Messverfahren

Quantitative Messverfahren dienen der genauen numerischen Messung von Größen, Mengen oder Eigenschaften eines Phänomens. Ein Beispiel hierfür ist die messtechnische Bestimmung der Dralltiefe.

## Taktile Oberflächenmessverfahren

Taktile Oberflächenmessverfahren messen die Oberfläche nach dem Tastschnittverfahren, welches in DIN EN ISO 3274 [11] genormt ist. Die Ermittlung der Form, Welligkeit und Rauheit einer Wellenoberfläche kann mittels taktiler Oberflächenmessverfahren auf Basis von Oberflächenprofilen erfolgen.

## Optische Oberflächenmessverfahren

Optische Oberflächenmessverfahren sind Messtechniken, bei denen verschiedene Eigenschaften des Lichts und optische Sensoren eingesetzt werden, um dreidimensionale Topographien der Oberfläche zu erzeugen.

## Messraster

Die Anordnung der Messfeldpositionen auf der Wellenoberfläche sowie deren jeweilige Größe werden durch ein Messraster definiert.

## Taumelkompensation

Ein zylindrisches Bauteil (Welle), das schief im Backenfutter eines Messgeräts eingespannt ist, führt eine taumelnde Bewegung aus. Dadurch entstehen Winkelfehler, die sich umfangsabhängig auf die Messdaten übertragen und zu falschen Ergebnissen führen können. Die Taumelkompensation gleicht diese Winkelfehler algorithmisch aus. Hierfür sind bestimmte Bedingungen an das Messraster erforderlich.

## Oberflächen-Stitching

Das Zusammensetzen der Oberflächentopographien mehrerer überlappender Messfelder zu einer einzelnen großen Oberflächentopographie wird Stitching genannt.

## 5 Oberflächenbeschaffenheit der Dichtungsgegenauflächen – Grundlagen

Die Oberflächenbeschaffenheit einer Dichtungsgegenaufläche beeinflusst das tribologische System „Radial-Wellendichtung“ in erheblichem Maße. Eine umfassende Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes zu Radial-Wellendichtungen und deren Funktionsmechanismen, wie beispielsweise den im dynamischen Betrieb vorhandenen aktiven Dichtmechanismus, findet sich in [17]. Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften sowie die derzeit bekannten Einflussmechanismen der Dichtungsgegenaufläche auf das Radial-Wellendichtsystem aufgeführt.

### 5.1 Bearbeitungsverfahren

Als Bearbeitungsverfahren für die Dichtungsgegenaufläche wird ein Außenrundscheifprozess im Einstechverfahren empfohlen. Empirische tribologische Untersuchungen der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass die daraus resultierende Oberflächenstruktur optimale hydrodynamische Eigenschaften für die Abdichtung mit Elastomer-Radial-Wellendichtungen aufweist.

Für die Bearbeitung der Dichtungsgegenaufläche können auch alternative Verfahren wie verschiedene Dreh- oder Rollierprozesse eingesetzt werden. Allerdings weisen die Dichtungsgegenauflächen dieser Verfahren im Vergleich zum Außenrundscheifprozess im Einstechverfahren schlechtere hydrodynamische Eigenschaften auf. Dies führt zu einer Einschränkung der möglichen Betriebsbedingungen hinsichtlich der maximalen Wellenumfangsgeschwindigkeit und der zulässigen Einsatztemperatur. Eine empirische Erprobung beim Einsatz derartiger Bearbeitungsverfahren ist dringend empfohlen.

### 5.2 Gestaltabweichungen der Dichtungsgegenaufläche

Für die Beschaffenheit der Dichtungsgegenaufläche sind gemäß DIN 4760 [3] Formabweichungen der 1. Ordnung (Form), 2. Ordnung (Welligkeit) sowie 3. Ordnung und 4. Ordnung (Rauheit) relevant.

#### 5.2.1 Form und Welligkeit der Dichtungsgegenaufläche

Abweichungen von Form und Welligkeit der Dichtungsgegenaufläche außerhalb des Toleranzbereichs der gängigen Normen für Radial-Wellendichtungen (beispielsweise DIN 3761 [2]) können dazu führen, dass die Dichtkante des Radial-Wellendichtungs im dynamischen Betrieb der Relativbewegung der Wellenoberfläche nicht mehr folgen kann (*Verlust der Folgefähigkeit*). Dies ist auf das visko-elastische Materialverhalten der Dichtungswerkstoffe zurückzuführen. In der Folge können Undichtheiten entstehen.

#### 5.2.2 Oberflächenrauheit der Dichtungsgegenaufläche

Die Oberflächenrauheit der Dichtungsgegenaufläche beeinflusst das Verschleißverhalten der Komponenten des Dichtsystems, sowie den aktiven Dichtmechanismus und den tribologischen Zustand im Dichtkontakt. Eine zuverlässige Dichtfunktion über

einen längeren Zeitraum erfordert die Einhaltung eines beidseitig begrenzten Toleranzbereichs der Oberflächenrauheit. Zu raue Dichtungsgegenläufigkeiten führen zu einem erhöhten Verschleiß der Dichtkante und infolgedessen zu Leckage. Eine zu geringe Rauheit der Dichtungsgegenläufigkeiten hingegen führt zu einer schlechteren hydrodynamischen Schmierung des Dichtkontakts und durch eine verminderte Konditionierung der Dichtkante zu einer Beeinträchtigung der notwendigen aktiven Förderwirkung des Radial-Wellendichtrings. Infolgedessen resultieren ein beeinträchtigt Abdichtvermögen des Radial-Wellendichtrings und eine erhöhte thermischen Belastung der Systemkomponenten des Radial-Wellendichtsystems.

### 5.3 Drall – Grundlagen und Definitionen

Drall bezeichnet in der Dichtungstechnik die Gesamtheit von Strukturen auf Dichtungsgegenläufigkeiten von Radial-Wellendichtungen, die bei Rotation der Welle das abzudichtende Fluid in axialer Richtung durch den Dichtspalt fördern. Die Förderrichtung ist hierbei abhängig von der Drehrichtung der Welle und der Drallorientierung und kann in Leckage oder Mangelschmierung des Dichtkontakts resultieren, siehe Abbildung 2. Die Bezeichnung der Drallorientierung erfolgt entsprechend der Definition eines Schraubengewindes in Rechts- und Linksdrall. Die zugehörigen Kenngrößen beschreiben die Drallorientierung eines Rechtsdralls mit positivem Vorzeichen und eines Linksdralls mit negativem Vorzeichen. Für die Definition der Wellendrehrichtung in Abbildung 2 gilt die Blickrichtung von der Luft- zur Fluidseite des Radial-Wellendichtrings.

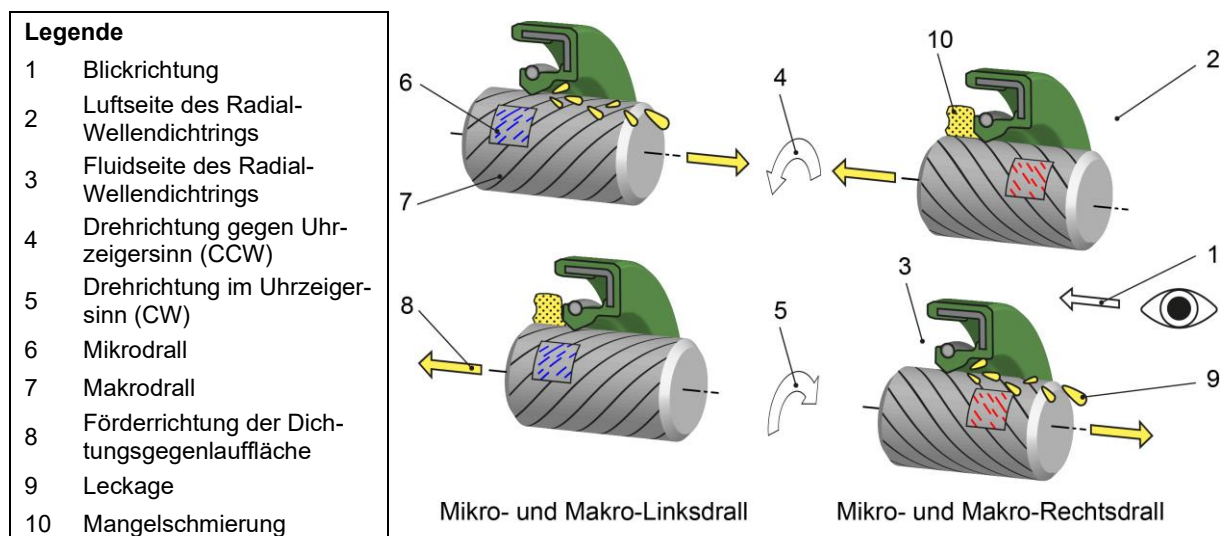


Abbildung 2: Darstellung der drehrichtungsabhängigen Auswirkungen von Drall auf der Dichtungsgegenläufigkeit: Leckage und Mangelschmierung nach [17]

Auf geschliffenen Dichtungsgegenläufigkeiten können verschiedene Kategorien von Drall überlagert auftreten. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht dieser Kategorien. In Abbildung 3 ist darüber hinaus für jede Drall-Kategorie eine exemplarische Topographie abgebildet.

Tabelle 1: Übersicht der Drall-Kategorien

Kategorie	Charakteristik
Mikrodrall	Stochastisch verteilte Schleifriefen, anisotrop, Abbildung 3 (a)
Periodischer Makrodrall	Achsperiodische Strukturen, anisotrop, in Umfangsrichtung Gewinde-artig umlaufend, Abbildung 3 (b)
Aperiodischer Makrodrall	Aperiodische / stochastisch verteilte Strukturen, anisotrop, in Umfangsrichtung umlaufend/unterbrochen, Abbildung 3 (c)
Oberflächenunvollkommenheiten	Nach DIN EN ISO 8785 [10], z. B. Riefen und Kratzer, Abbildung 3 (d)

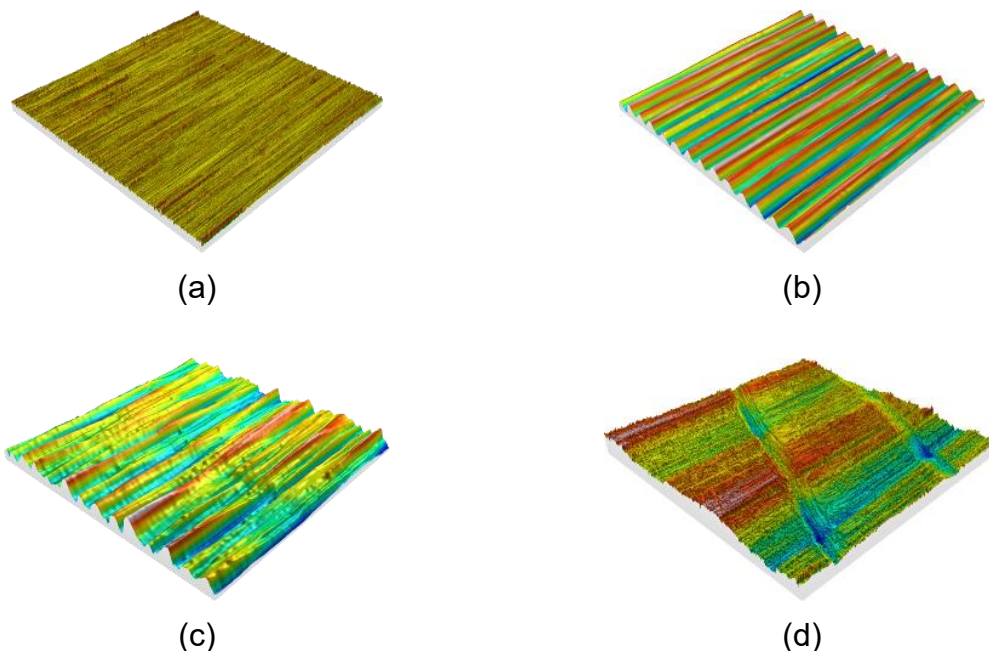


Abbildung 3: Drall-Kategorien auf der Dichtungsgegenaufläachen

## 6 Messmethoden für Gestaltabweichungen

Die Gestaltabweichungen von Dichtungsgegenauflflächen werden anhand von Geometriemessdaten (Form, Rundheit, etc.), axialen 2D-Profilen (Rauheit und Welligkeit) und flächenhaften Topographiemessdaten (3D-Kenngrößen) bestimmt. Relevante Kenngrößen und Prüfmerkmale der Dichtungsgegenauflflächen bezüglich der Gestaltabweichungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Für die normgerechte Ermittlung muss das Verfahren für die Messung, Filterung und Datenaufbereitung festgelegt werden. Die Rauheits- und Formmessung ist in der Industrie etabliert und wird daher an dieser Stelle nicht näher erläutert.

Anwendung finden die nachfolgend aufgeführten Normen und Richtlinien:

DIN EN ISO 3274 [11]	Tastschnittverfahren
DIN EN ISO 16610-1 [12]	Filterung – Überblick und grundlegende Konzepte
DIN EN ISO 21920-1– 3 [4–6]	Oberflächenbeschaffenheit: Profile
DIN EN ISO 25178 1– 3 [7–9]	Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft

*Anmerkung 1: Die Default-Einstellungen zur Bestimmung der Kenngrößen des Rauheitsprofils (R-Kenngrößen, bzw. Rauheitskenngrößen) und des Welligkeitsprofils (W-Kenngrößen) ergeben sich nach den Einstellungsklassen in DIN EN ISO 21920-3. Default-Einstellungen umfassen die Mess- und Filterbedingungen eines Profils. Geschliffene Dichtungsgegenauflflächen für Elastomer-Radial-Wellendichtringe liegen in ihrer Rauheit in Einstellungs-kategorie Sc3, vgl. DIN EN ISO 21920-3 Tabelle 3. Falls in den Zeichnungseintragungen keine abweichenden Spezifikationen angegeben werden, wird nach diesen Default-Einstellungen verfahren.*

*Anmerkung 2: Die Norm DIN EN ISO 25178 definiert kein festes Vorgehen zur Bestimmung der flächenhaften 3D-Kenngrößen. Daher ist die eindeutige Angabe und Abstimmung der verwendeten Filter und Messbedingungen zwingend erforderlich.*

### 6.1 R-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenauflfläche

#### 6.1.1 Maximale Höhe des Rauheitsprofils

Rz [ $\mu\text{m}$ ]

Zur Bestimmung von Rz wird das Rauheitsprofil in fünf gleich große Abschnitte in Achsrichtung unterteilt, vgl. DIN EN ISO 21920-3, Tabelle 3. Rz ist der Mittelwert der vertikalen Differenzen vom tiefsten zum höchsten Punkt innerhalb der einzelnen Abschnitte des Rauheitsprofils.

#### 6.1.2 Arithmetischer Mittelwert des Rauheitsprofils

Ra [ $\mu\text{m}$ ]

Ra ist der arithmetische Mittelwert der Absolutwerte der Profilwerte.

### 6.1.3 Maximale Höhe je Abschnitt des Rauheitsprofils

Rzx [ $\mu\text{m}$ ]

Rzx ist der Höchstwert der vertikalen Differenz vom tiefsten zum höchsten Punkt eines gleitenden Abschnittes der Länge  $l$  durch das Rauheitsprofil, vgl. DIN EN ISO 21920-3, Tabelle 7.

*Anmerkung: Vor der Einführung der maximalen Höhe je Abschnitt des Rauheitsprofils Rzx mit der Normenreihe DIN EN ISO 21920-3 wurde die maximale Rauheitshöhe Rmax nach VDA 2006 verwendet.*

## 6.2 W-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenlauffläche

### 6.2.1 Gesamthöhe des Welligkeitsprofils

Wt [ $\mu\text{m}$ ]

Wt ist die vertikale Differenz vom tiefsten zum höchsten Punkt des Welligkeitsprofils.

## 6.3 S-Kenngrößen zur Beschreibung der Dichtungsgegenlauffläche

### 6.3.1 Maximale Höhe

Sz [ $\mu\text{m}$ ]

Sz ist die vertikale Differenz vom tiefsten zum höchsten Punkt der skalenbegrenzten Oberfläche.

### 6.3.2 Arithmetischer Mittelwert der Höhe

Sa [ $\mu\text{m}$ ]

Sa ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Ordinatenwerte der skalenbegrenzten Oberfläche.

## 6.4 Formabweichungen der Dichtungsgegenlauffläche

Geometrische Formabweichungen der Dichtungsgegenlauffläche können mit einer Koordinatenmessmaschine oder Rundprüfeinrichtung überprüft werden. Relevante Größen sind der Durchmesser, die Rundheit oder Umfangswelligkeit und die Zylindrizität der Welle.

## 6.5 Beschädigungen der Dichtungsgegenlauffläche

Vor der Montage des Dichtsystems wird eine Sichtprüfung der Dichtungsgegenlauffläche empfohlen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Dichtungsgegenlauffläche frei von Beschädigungen, wie z. B. Schlagstellen, Kratzern, Rissen, Rost und Erhebungen ist.

## 7 Messmethoden für Drall

Bei den Messmethoden für Drall ist zu beachten, dass die einzelnen Methoden nur für die Erfassung bestimmter Drall-Kategorien geeignet sind. Außerdem wird in quantitative und qualitative Methoden unterschieden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Messmethoden für Drall, ihrer nachweisbaren Drall-Kategorien und Art des Ergebnisses. Für eine umfassenden Drall Analyse müssen Drallmessmethoden kombiniert angewendet werden. Eine umfassende Zusammenfassung zum Themenkomplex Drallmessung und zum aktuellen Kenntnisstand der funktionalen Beschreibung der Auswirkungen von Drall sind in [18] beschrieben.

Tabelle 2: Übersicht der Mess- und Prüfmethode für Drall mit Angabe der Eignung und Art des Ergebnisses

Messmethode		Eignung			Ergebnis	
		Mikrodrall	Makrodrall		qualitativ	quantitativ
			periodisch	aperiodisch		
7.1	Strukturbasierte Mikrodrall Analyse	X	--	--	--	X
7.2	Strukturbasierte Makrodrall Analyse	--	X	X	--	X
7.3	Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7	--	X	--	--	X
7.4	Dominante Welligkeit nach VDA 2007	--	(X) <sup>1</sup>	--	--	X
7.5	Drallprüfung mit der Fadenmethode	X	X	X	X <sup>2</sup>	--
7.6	Drallprüfung mit dem Streulichtverfahren	--	X	--	X	--

<sup>1</sup> Nur bedingt, da die Kenngrößen nur an einzelnen Profilen ermittelt werden. Somit kann kein Makrodrallwinkel ermittelt werden, vgl. Abschnitt 7.4.

<sup>2</sup> Vorwiegend qualitative Messmethode. Es kann zwar ein theoretischer Drallwinkel ermittelt werden, da der Faden aber durch alle vorhandenen überlagerten Drall-Kategorien beeinflusst wird, ist keine Differenzierung von Drall-Kategorien möglich, vgl. Abschnitt 7.5.

Nachfolgend werden die Mess- und Prüfmethode sowie ihre Ergebnisse kurz beschrieben und relevante Kenngrößen aufgeführt. Detaillierte Beschreibungen und weiterführende Quellen werden im Anhang erläutert.

## 7.1 Strukturbasierte Mikrodrall Analyse

Die Methodik der strukturbasierten Mikrodrall Analyse wurde im Rahmen der FKM Projektreihe „Strukturanalyse“ [19–21] entwickelt. Im Rahmen der Auswertung werden Schleifriefen separiert, geometrisch lokalisiert und als Geometrielemente ausgewertet. Eine anschließende statistische Auswertung ergibt die strukturbasierten Mikrodrallkenngrößen und zugehörigen Diagrammdarstellungen.

Anhang A.1 enthält eine Beschreibung der Messstrategie der strukturbasierten Mikrodrall Analyse sowie beispielhafte Protokollansichten zur Dokumentation der Mess- und Auswertungsergebnisse. Eine Strategie der kombinierten Messung zur strukturbasierten Auswertung von Mikro- und Makrodrall sowie ein Gesamtprotokoll „Drall“ ist in Anhang A.3 dargestellt. Im Folgenden werden die relevanten strukturbasierten Mikrodrallkenngrößen und Darstellungen erläutert.

### 7.1.1 Winkelverteilungskurve und Winkelvolumenverteilungskurve

Die Winkelverteilungskurve und Winkelvolumenverteilungskurve stellen die Anzahl bzw. das Volumen gleichgerichteter Schleifriefen kumuliert über die Winkelorientierung dar. Die Nullgradlage des Diagramms kennzeichnet die Umfangsrichtung der Welle. Zugehörige Kenngrößen zur Winkelverteilungskurve und Winkelvolumenverteilungskurve sind der Medianwinkel der Winkelverteilung  $S_{d_{\text{median},S}}$ , der Medianwinkel der Winkelvolumenverteilung  $S_{d_{\text{median},V}}$  und die Standardabweichung der Winkelorientierungen  $S_{d_{\text{std}}}$ .

Eine optimale Dichtungsgegenlauffläche weist symmetrische und in Umfangsrichtung orientierte Verteilungskurven mit definierter minimaler Verteilungsbreite auf. Ob ein Mikro-Links- oder Mikro-Rechtsdrall vorliegt, ist anhand einer Verschiebung oder Asymmetrie und damit einer Ungleichverteilung der Verteilungskurven zu erkennen. Eine Farbcodierung kennzeichnet linksorientierte Schleifriefen als negative Orientierungen (blau) und rechtsorientierte Schleifriefen als positive Orientierungen (rot).

Abbildung 4 zeigt drei Beispiele für verschiedene Mikrodrall-Winkelverteilungskurven. Rot gekennzeichnete Kenngrößen fallen außerhalb der in Abschnitt 0 beispielhaft angegebenen Toleranzbereiche. Vollständige Protokollbeispiele der Dichtungsgegenlaufflächen in Abbildung 4 sind im Anhang A.1.2 dargestellt.

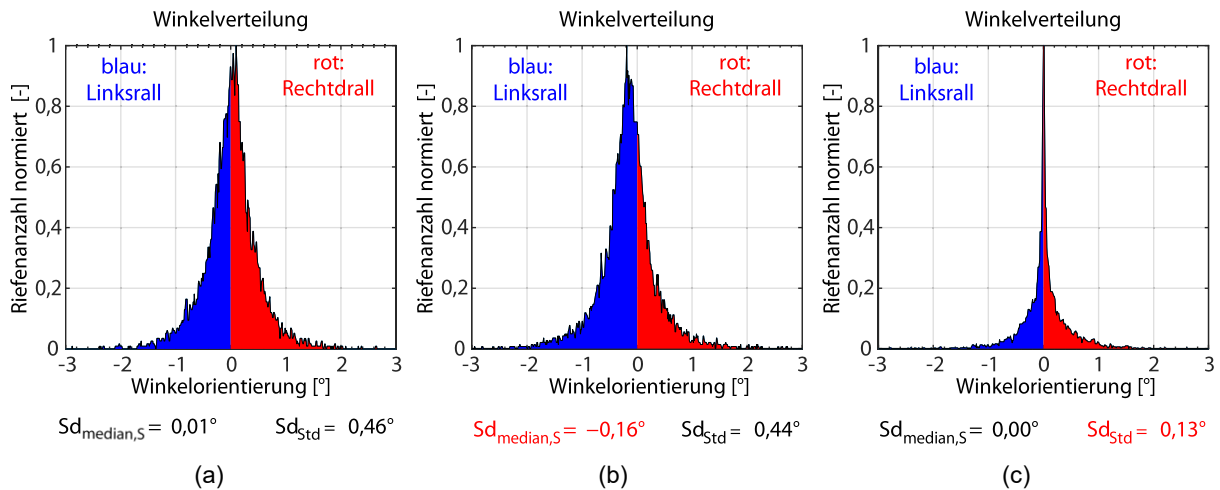


Abbildung 4: Beispiele Mikrodrall-Winkelverteilungskurven:

- (a) symmetrisch zur Umfangsrichtung und mit Verteilungsbreite im Toleranzbereich – Mikrodrall-frei;
- (b) in den negativen Winkelbereich verschoben – Mikro-Linksdrall;
- (c) symmetrisch und in Umfangsrichtung orientiert mit Verteilungsbreite außerhalb des Toleranzbereiches

### 7.1.2 Medianwinkel der Mikrodrall-Winkelverteilung

$Sd_{\text{median},S} [^\circ]$

Der Medianwinkel der Winkelverteilung  $Sd_{\text{median},S}$  gibt den Winkelwert an, für den sowohl die Anzahl größerer als auch kleinerer Riefenwinkel gleich ist.

*Anmerkung: Für  $Sd_{\text{median},S}$  sind Werte nahe  $0,00^\circ$  anzustreben. Dann besteht ein Gleichgewicht zwischen links- und rechtsorientierten Riefen und eine Förderwirkung ist nicht vorhanden, bzw. gering.*

### 7.1.3 Medianwinkel der Mikrodrall-Winkelvolumenverteilung

$Sd_{\text{median},V} [^\circ]$

Der Medianwinkel der Winkelvolumenverteilung  $Sd_{\text{median},V}$  gibt den Winkelwert an, für den das aufsummierte, gerichtete Riefenvolumen links und rechts des Winkelwerts gleich ist.

*Anmerkung: Für  $Sd_{\text{median},V}$  sind Werte nahe  $0,00^\circ$  anzustreben. Dann besteht ein Gleichgewicht zwischen links- und rechtsorientiertem Riefenvolumen und eine Förderwirkung ist nicht vorhanden, bzw. gering.*

#### 7.1.4 Standardabweichung der Mikrodrall-Winkelverteilung

$S_{d\text{std}}$  [°]

Die Standardabweichung  $S_{d\text{std}}$  wird als statistisches Maß für die auftretende Streuung der Winkelorientierungen verwendet. Sie beschreibt die Breite der Winkelverteilungskurve und wird anhand einer, an die normierte Winkelverteilung eingepassten Gauss-Kurve abgeleitet.

*Anmerkung: Größere Werte der Standardabweichung  $S_{d\text{std}}$  und damit breitere Winkelverteilungen sind von Vorteil. Der Fluidaustausch im Dichtspalt wird begünstigt und potentielle Verschiebungen der Verteilung in eine Richtung wirken sich weniger stark auf die absoluten prozentualen Anteile links- und rechtsorientierter Riefen aus. Dies lässt eine höhere Stabilität der Dichtfunktion für breitere Verteilungen erwarten.*

#### 7.1.5 Arithmetisch gemittelte Mikrodralltiefe

$S_{d_t}$  [µm]

$S_{d_t}$  ist der arithmetische Mittelwert der Tiefen aller erfassten Mikrodrallstrukturen.

*Anmerkung: Tiefere Riefen bewirken größere Förderwerte, da sie eine größere Menge an Flüssigkeit fassen und axial fördern können.*

#### 7.1.6 Prozentualer Anteil der links- und rechtsorientierten Mikrodrallstrukturen

$S_{d_{\text{Sum,li}}} / S_{d_{\text{Sum,re}}}$  [%]

$S_{d_{\text{Sum,li}}}$  und  $S_{d_{\text{Sum,re}}}$  stellen die prozentualen Anteile der Summen aller links- und rechtsorientierten Mikrodrallstrukturen der Winkelverteilungskurve dar.

#### 7.1.7 Prozentualer Anteil des links- und rechtsorientierten Strukturvolumens

$S_{d_{\text{Vol,li}}} / S_{d_{\text{Vol,re}}}$  [%]

$S_{d_{\text{Vol,li}}}$  und  $S_{d_{\text{Vol,re}}}$  stellen die prozentualen Anteile des links- und rechtsorientierten kumulierten Strukturvolumens der Winkelvolumenverteilung dar.

#### 7.1.8 Anzahl Mikrodrallstrukturen pro Quadratmillimeter

$S_{d_{\text{Sum,tot}}}$  [1/ mm<sup>2</sup>]

$S_{d_{\text{Sum,tot}}}$  ist die auf eine Messfläche von 1 mm<sup>2</sup> bezogene Anzahl erfasster Mikrodrallstrukturen.

## 7.2 Strukturbasierte Makrodrall Analyse

Die Mess- und Auswertungsmethodik der strukturbasierten Makrodrall Analyse wurde im Projekt FVA 876 „3D-Makrodrall“ [22] entwickelt. Im Rahmen der Auswertung werden Makrodrallstrukturen in 3D-Topographien lokalisiert und als Geometrieelemente ausgewertet. Diese Strukturen können sowohl periodische als auch aperiodische Ausprägungen aufweisen. Eine nachfolgende statistische Auswertung ergibt die strukturbasierten Makrodrallkenngrößen und zugehörigen Diagrammdarstellungen.

Anhang A.2 enthält eine Beschreibung der Messstrategie der strukturbasierten Makrodrall Analyse sowie beispielhafte Protokollansichten zur Dokumentation der Mess- und Auswertungsergebnisse. Eine Strategie der kombinierten Messung zur strukturbasierten Auswertung von Mikro- und Makrodrall sowie ein Gesamtprotokoll „Drall“ ist in Anhang A.3 dargestellt. Im Folgenden werden die relevanten strukturbasierten Makrodrallkenngrößen und Darstellungen erläutert.

### 7.2.1 Median der Strukturwinkel

$SD\gamma_{\text{median}}$  [°]

$SD\gamma_{\text{median}}$  ist der Medianwert der Strukturwinkel aller erfassten Strukturen.

*Anmerkung: Für  $SD\gamma_{\text{median}}$  sollten Werte nahe  $0,00^\circ$  angestrebt werden, um ein Gleichgewicht zwischen links- und rechtsorientierten Strukturwinkeln zu erreichen und eine Förderwirkung der Strukturen zu vermeiden oder zu minimieren.*

### 7.2.2 Standardabweichung der Strukturwinkel

$SD\gamma_{\text{std}}$  [°]

$SD\gamma_{\text{std}}$  ist die Standardabweichung der Strukturwinkel aller erfassten Strukturen und somit ein Maß für die Streuung der Strukturwinkel.

*Anmerkung 1: Geringe Werte von  $SD\gamma_{\text{std}}$  weisen auf eine Dichtungsgegenlauffläche mit stark gerichteten Strukturen hin. Je größer die Standardabweichung, desto größer die Streuung der einzelnen Strukturwinkel und somit auch der Grad der Isotropie der Oberfläche.*

*Anmerkung 2: Im Allgemeinen führen größere Standardabweichungen der Strukturwinkel  $SD\gamma_{\text{std}}$  zu stabileren Abdichtbedingungen und begünstigen den Fluidaustausch im Dichtspalt.*

### 7.2.3 Mittelwert der Strukturbreiten

$SDB_{\text{mean}}$  [µm]

$SDB_{\text{mean}}$  entspricht dem Mittelwert der Strukturbreiten aller erfassten Strukturen.

*Anmerkung 1: Geringere Strukturbreiten  $SDB_{\text{mean}}$  führen zu einer Erhöhung der Anzahl förderaktiver Strukturen im Dichtkontakt und somit zu einer Steigerung der Förderwirkung der Dichtungsgegenlauffläche.*

*Anmerkung 2: Zur Beurteilung der Dichtungsgegenlauffläche muss die mittlere Strukturbreite  $SDB_{mean}$  in Kombination mit der Standardabweichung der Strukturbreiten  $SDB_{std}$  betrachtet werden.*

## 7.2.4 Standardabweichung der Strukturbreiten

$SDB_{std}$  [ $\mu\text{m}$ ]

$SDB_{std}$  ist die Standardabweichung der Strukturbreiten aller erfassten Strukturen und somit ein Maß für die Streuung der Strukturbreiten.

*Anmerkung 1: Geringe Werte von  $SDB_{std}$  deuten drauf hin, dass alle Strukturen eine ähnliche Strukturbreite aufweisen. Hierüber kann ein Rückschluss auf axiale Periodizität erfolgen. Je größer die Standardabweichung der Strukturbreiten ist, desto aperiodischer wird die Oberflächenstruktur eingeordnet.*

*Anmerkung 2: Zur Beurteilung der Dichtungsgegenlauffläche muss die mittlere Strukturbreite  $SDB_{mean}$  in Kombination mit der Standardabweichung der Strukturbreiten  $SDB_{std}$  betrachtet werden.*

## 7.2.5 Variationskoeffizient der Strukturbreiten

$\text{VarK}_{SDB}$  [-]

$\text{VarK}_{SDB}$  ist der Variationskoeffizient der Strukturbreiten und bildet sich aus dem Verhältnis der Standardabweichung der Strukturbreiten  $SDB_{std}$  und der arithmetisch gemittelten Strukturbreite  $SDB_{mean}$ .

$$\text{VarK}_{SDB} = \frac{SDB_{std}}{SDB_{mean}}$$

$\text{VarK}_{SDB}$  ist ein relatives Streumaß der Strukturbreiten und dient als Kennwert für das Vorhandensein einer axial periodischen Struktur auf der Oberfläche. Die Stärke der axialperiodischen Ausprägung nimmt von 0 aufsteigend ab.

## 7.2.6 Mittelwert der Strukturturen

$SDT_{mean}$  [ $\mu\text{m}$ ]

$SDT_{mean}$  entspricht dem Mittelwert aller erfassten Strukturturen.

*Anmerkung: Tiefere Strukturen bewirken größere Förderwerte, da sie eine größere Menge an Flüssigkeit fassen und axial fördern können.*

## 7.2.7 Mittlere Strukturlänge normiert auf die Messfeldlänge

$SDL_{mean,n}$  [-]

$SDL_{mean,n}$  ist das Verhältnis der mittleren Strukturlänge  $SDL_{mean}$  zur Länge des Messfeldes in Umfangsrichtung  $l_y$ .

$$SDL_{mean,n} = \frac{SDL_{mean}}{l_y}$$

Die Kenngröße zeigt qualitativ an, ob umlaufende oder in Umfangsrichtung unterbrochene Strukturen vorliegen, was eine Unterscheidung zwischen periodischen und aperiodischem Makrodrall gleichkommt.

## 7.2.8 Strukturwinkelverteilung

Die Strukturwinkelverteilung stellt die Anzahl gleichgerichteter Strukturen über die Winkelorientierung in Form eines Histogramms dar. Die Nullgradlage kennzeichnet die Umfangsrichtung der Welle. Zugehörige Kenngrößen zur Strukturwinkelverteilung sind der Median der Strukturwinkel  $SDY_{med}$  und die Standardabweichung der Strukturwinkel  $SDY_{std}$ .

Eine optimale Dichtungsgegenauflfläche weist eine symmetrische Strukturwinkelverteilung um die Nullgradlage mit einer breiten Streuung auf. Ein Makro-Links- oder Makro-Rechtsdrall lässt sich anhand einer Ungleichverteilung der Strukturwinkel um die Nullgradlage erkennen. Eine Farbcodierung kennzeichnet linksorientierte Strukturen als negative Orientierungen (blau) und rechtsorientierte Strukturen als positive Orientierungen (rot).

Abbildung 5 zeigt zwei Beispiele unterschiedlicher Strukturwinkelverteilungen. Rot gekennzeichnete Kenngrößen fallen außerhalb der in Abschnitt 9.3 beispielhaft angegebenen Toleranzbereiche. Vollständige Protokollbeispiele der Dichtungsgegenauflflächen in Abbildung 5 sind im Anhang A.2.2 dargestellt.

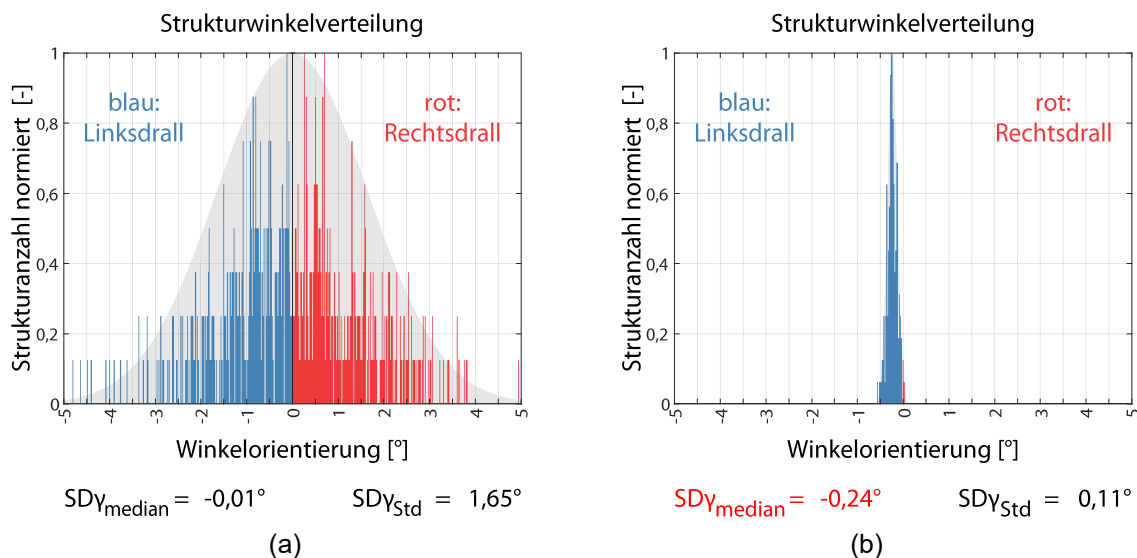


Abbildung 5: Beispiele Strukturwinkelverteilungen:

- (a) symmetrisch zur Umfangsrichtung und mit breiter Streuung der einzelnen Orientierungen – *Makrodrall-frei*;
- (b) nahezu vollständig in den negativen Winkelbereich verschoben und mit geringer Verteilungsbreite, prognostizierte Förderwirkung – *periodischer oder aperiodischer Makrodrall*

## 7.2.9 Strukturbreitenverteilung

Die Strukturbreitenverteilung stellt die Anzahl der Strukturen mit gleicher Strukturbreite in Form eines Histogramms dar. Anhand dieser Darstellung lassen sich verschiedene Verteilungscharakteristiken der Strukturen auf der Dichtungsgegenaufläche aufzeigen.

Zwei unterschiedliche Beispiele für Strukturbreitenverteilungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Vollständige Protokollbeispiele der Dichtungsgegenauflachen in Abbildung 6 sind im Anhang A.2.2 dargestellt.

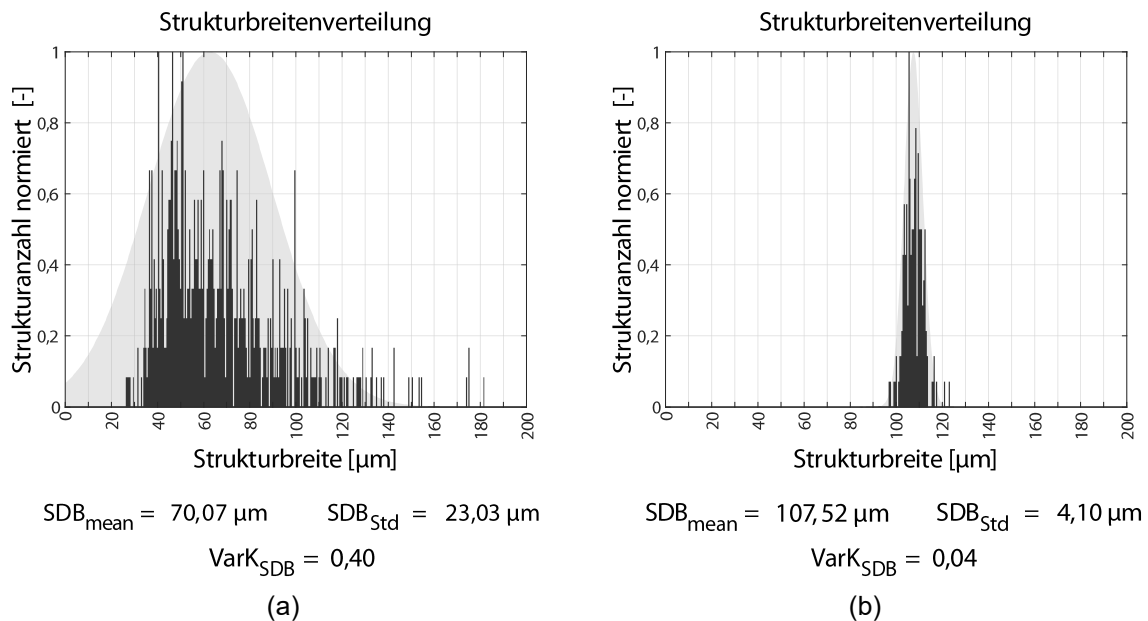


Abbildung 6: Beispiele Strukturbreitenverteilungen:

- (a) große Bandbreite an vorkommenden Strukturbreiten ohne erkennbare Regelmäßigkeit in der Verteilung – *Makrodrall-frei oder aperiodischer Makrodrall*;
- (b) normalverteilte Strukturbreiten mit geringer Verteilungsbreite – *periodischer Makrodrall*

## 7.3 Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Die Mercedes-Benz Werksnorm MBN 31007-7 [13] beschreibt ein Mess- und Auswertverfahren zum quantitativen Nachweis von axial periodischem, in Umfangsrichtung umlaufendem Makrodrall. Die Vermessung der Dichtungsgegenlauffläche erfolgt anhand eines festgelegten Messrasters aus axialen Oberflächenprofilen am Umfang der Welle. Ausgehend von einer FFT (Fast Fourier Transformation) Analyse wird die Oberfläche mit einer mathematischen Ansatzfunktion approximiert und die Makrodrallkenngrößen nach MBN 31007-7 anhand der approximierten Dralloberfläche ermittelt. Das Vorgehen zur Berechnung ist in [23, 24] beschrieben.

Anhang A.4 enthält eine Beschreibung der Messstrategie der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 sowie beispielhafte Protokollansichten zur Dokumentation der Mess- und Auswertungsergebnisse. Im Folgenden werden die relevanten Makrodrallkenngrößen nach MBN 31007-7 erläutert.

### 7.3.1 Drallwinkel

$D\gamma$  [°]

$D\gamma$  ist der Winkel zwischen der Umfangsrichtung und der Drallstruktur.

*Anmerkung: Bei positivem Vorzeichen des Winkels handelt es sich um einen Rechtsdrall, bei negativem Vorzeichen des Winkels handelt es sich um einen Linksdrall.*

### 7.3.2 Periodenlänge

DP [mm]

DP ist der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen, bzw. Wellentälern in Achsrichtung.

*Anmerkung: Geringere Periodenlängen DP führen zu einer Erhöhung der Anzahl förderaktiver Strukturen im Dichtkontakt und somit zu einer Steigerung der Förderwirkung der Dichtungsgegenlauffläche.*

### 7.3.3 Dralltiefe

$Dt$  [µm]

$Dt$  ist der maximale vertikale Abstand zwischen Wellenberg und Wellental.

*Anmerkung: Tiefere Strukturen bewirken größere Förderwerte, da sie eine größere Menge an Flüssigkeit fassen und axial fördern können.*

### 7.3.4 Gängigkeit

DG [-]

DG ist die Anzahl der Perioden in Umfangsrichtung, bezogen auf 360°.

*Anmerkung: Die Gängigkeit DG berücksichtigt den Drallwinkel  $D\gamma$ , die Periodenlänge DP und den Wellendurchmesser in einem Wert.*

### 7.3.5 Theoretischer Förderquerschnitt

DF [ $\mu\text{m}^2$ ]

DF ist die Querschnittsfläche einer Periodenlänge in einem Axialschnitt der Dralloberfläche.

## 7.4 Dominante Welligkeit nach VDA 2007

Die VDA 2007-Richtlinie [15] vom Verband der Automobilindustrie (VDA) definiert eine algorithmische Auswertungsmethode für periodische Oberflächenstrukturen. Die Methode analysiert vorhandene periodische Anteile in einem Oberflächenprofil mittels einer Bandpassfilterung. Die Oberflächenprofile werden nach dem Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 3274 [11] oder auch mittels optischer Messung erfasst. Die Kenngrößen können zur Erkennung von periodischem Makrodrall verwendet werden. Die vollständige Beschreibung eines periodischen Makrodralls ist jedoch nicht möglich, da keine Bestimmung eines Drallwinkels möglich ist.

*Anmerkung 1: Die Auswertungsmethode ermittelt dominante Ausprägung der Periodenlängen der axialen Messtrecke in im Bereich  $0,02 \text{ mm} \leq \text{WDSm} \leq \text{ln}/5$ .*

*Anmerkung 2: Wenn eine Dominanz mit einer mittleren Höhe der Profilelemente von  $\text{WDc} \geq 0,3 \mu\text{m}$  erkannt wird, sollte die Dichtungsgegenlauffläche auf Makrodrall mit der Makrodrallauswertung nach MBN oder der 3D-Makrodrall Analyse untersucht werden.*

### 7.4.1 Horizontale Welligkeit

WDSm [ $\mu\text{m}$ ]

WDSm ist die aus dem Amplitudenspektrum ermittelte mittlere Periodenlänge der dominanten Welligkeit.

### 7.4.2 Gesamthöhe des Profils

WDt [ $\mu\text{m}$ ]

WDt ist die vertikale Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt des WD-Profils.

### 7.4.3 Mittlere Höhe der Profilelemente

WDc [ $\mu\text{m}$ ]

WDc ist der Mittelwert aus den vertikalen Differenzen der höchsten und tiefsten Punkte der Profilelemente (mittlere Höhe der Wellenberge).

## 7.5 Drallprüfung mit der Fadenmethode

Die Fadenmethode ist ein primär qualitatives Prüfverfahren mit dem sowohl Makro- als auch Mikrodrall auf Dichtungsgegenläufigkeiten detektiert werden kann. Das Vorhandensein von Drall wird anhand der Bewegung eines Fadens bewertet, der um die horizontal aufgespannte, rotierende Dichtungsgegenläufigkeit geschlungen wird. Bewegt sich der Faden in axialer Richtung, deutet dies auf einen Drall auf der Dichtungsgegenläufigkeit hin. Der Prüfaufbau sowie Spezifikationen an die Prüfung sind im Anhang A.5 aufgeführt.

Eine Unterscheidung zwischen Makro- und Mikrodrall auf der Dichtungsgegenläufigkeit ist mit der Fadenmethode nicht möglich, da der Faden durch die Oberfläche integral beeinflusst wird. Im ungünstigsten Fall kann eine Überlagerung von beispielsweise Makro-Rechtsdrall und Mikro-Linksdrall dazu führen, dass sich der Faden nicht in Achsrichtung bewegt und ein falsch-negatives Ergebnis erzielt wird.

### 7.5.1 Durchführung der Fadenmethode

- 1) Zur Durchführung der Fadenmethode wird die Welle horizontal in ein Backenfutter eingespannt und ausgerichtet, ggf. mit einem Reitstock.
- 2) Anschließend wird ein Faden um die Dichtungsgegenläufigkeit geschlungen und mit einem definierten Gewicht beschwert.
- 3) Über eine definierte Zeitdauer wird die Dichtungsgegenläufigkeit mit definierter Drehzahl in Rotationsrichtung 1 versetzt und der Faden beobachtet. Bewegt sich der Faden, wird die Richtung und die zurückgelegte Strecke dokumentiert.
- 4) Über dieselbe Zeitdauer und Drehzahl wird die Dichtungsgegenläufigkeit in die entgegengesetzte Rotationsrichtung 2 versetzt und der Faden beobachtet. Bewegt sich der Faden, wird die zurückgelegte Strecke sowie die Richtung dokumentiert.

*Anmerkung: Zur Beobachtung und Dokumentation der Fadenbewegung und Bestimmung der zurückgelegten Fadenstrecke wird eine Digitalkamera mit einem vergrößerten Objektiv empfohlen.*

## 7.5.2 Auswertung der Fadenmethode

Ein Links- oder Rechtsdrall auf der Dichtungsgegenlauffläche wird gemäß Tabelle 3 ermittelt. Für ein eindeutiges Ergebnis müssen die Richtungen der Fadenbewegungen in Rotationsrichtung 1 und Rotationsrichtung 2 gegensätzlich sein.

Tabelle 3: Ergebnis der Fadenmethode in Anlehnung an Abbildung 2

	Drehrichtung gegen Uhrzeigersinn (CCW)	Drehrichtung im Uhrzeigersinn (CW)	Integrale Drallorientierung
Axiale Richtung der Fadenbewegung	rechts	links	Linksdrall
	links	rechts	Rechtsdrall

*Anmerkung 1: Sind die gemessenen axialen Strecken in Rotationsrichtung 1 und Rotationsrichtung 2 nicht vergleichbar oder läuft der Faden in derselben Richtung, kann dies auf eine fehlerhafte Einspannung der Welle oder Welligkeit oder Formabweichung der Dichtungsgegenlauffläche hinweisen.*

*Anmerkung 2: Wenn bei der Fadenmethode eine Fadenbewegung festgestellt wird empfiehlt es sich, die Dichtungsgegenlauffläche weiterhin quantitativ auf Mikro- und Makrodrall zu untersuchen. Nur auf diese Weise kann die Drall-Kategorie auf der Dichtungsgegenlauffläche genau spezifiziert und beschrieben werden.*

## 7.5.3 Kenngrößen der Fadenmethode

Ein Vorgehen zur Bestimmung eines Drallwinkels  $\phi$  basierend auf der Fadenmethode ist in der Richtlinie OS 1-1 der RMA [16] dokumentiert. Dazu werden folgende Messgrößen benötigt.

$D$	[mm]	Durchmesser der Welle
$X$	[mm]	Axialer Fadenweg
$N$	[U/min]	Drehzahl
$t$	[s]	Prüfdauer

Formel zur Berechnung des Drallwinkel  $\phi$ :

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{X \cdot 60s}{\pi \cdot D \cdot N \cdot t} \right)$$

*Anmerkung: Das Ergebnis der Fadenmethode hängt von der Ausrüstung und dem Anwender ab. Außerdem kann der Drallwinkel  $\phi$  nicht uneingeschränkt mit den Winkelkenngrößen der quantitativen Methoden verglichen werden. Anwendereinflüsse, überlagerte Drallausprägungen sowie nicht einsehbare Einflussfaktoren beeinträchtigen das Ergebnis.*

## 7.6 Drallprüfung mit dem Streulichtverfahren

Das Streulichtverfahren erfasst periodischen Makrodrall mittels des Prinzips der Streulichtmesstechnik. Durch die Analyse des Beugungsmusters eines von der Dichtungsgegenlauffläche reflektierten Laserstrahls können Rückschlüsse auf axialperiodische Strukturen auf der Oberfläche gezogen werden. Das Funktionsprinzip in Form eines Handmessgerätes erlaubt eine Anwendung unter Fertigungsbedingungen.

Wenn bei der Streulichtmethode eine periodische Struktur festgestellt wird empfiehlt es sich, die Dichtungsgegenlauffläche weiterhin quantitativ auf Makrodrall zu untersuchen.

### 7.6.1 Kenngrößen des Streulichtverfahrens

Durch das Beugungsmuster können die Periodenlänge DP und Dralltiefe Dt nach [25] indirekt bestimmt werden. Die Bestimmung eines Drallwinkels ist funktionsbedingt nicht möglich.

## 8 Vorgehen bei der Analyse einer Dichtungsgegenlauffläche

Die Analyse von Dichtungsgegenlaufflächen kann gemäß Abbildung 7 erfolgen. Für eine umfassende Analyse muss die Dichtungsgegenlauffläche nach Oberflächenunvollkommenheiten, Gestaltabweichungen, Makrodrall und Mikrodrall untersucht werden.

Methoden mit qualitativem Ergebnis können lediglich auf das Vorhandensein von Drall oder anderen schädlichen Oberflächenausprägungen hinweisen. Sind Methoden mit quantitativem Ergebnis verfügbar, liefern diese eindeutige Messwerte und damit bessere Beschreibungen der Dichtungsgegenlauffläche.

Eine vollständige Drall- und Oberflächenanalyse ist empfohlen z. B. nach Änderungen am Schleifprozess (Prozessfreigabe), beim Einsatz neuer Schleifwerkzeuge oder sonstigen Maschinenanpassungen sowie im Schadensfall nach Leckagen an Radial-Wellendichtsystemen. Zur kontinuierlichen Prozessüberwachung können Stichprobenprüfung durchgeführt werden.

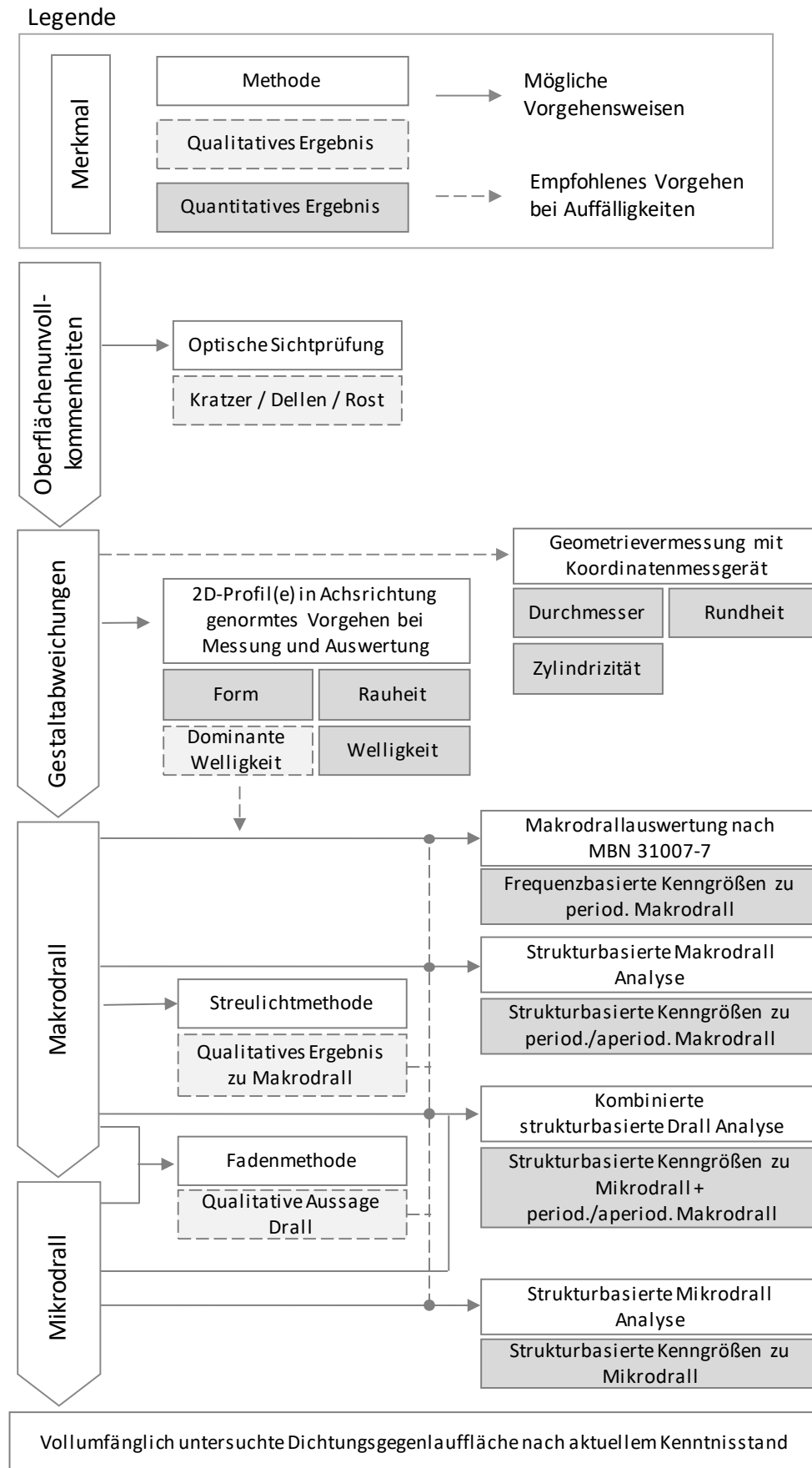
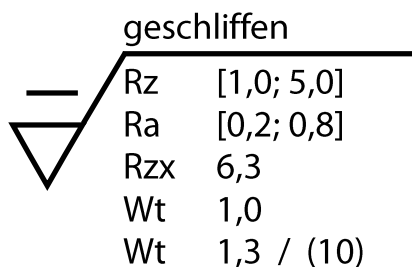


Abbildung 7: Vorgehen bei der Oberflächenanalyse der Dichtungsgegenauflfläche

## 9 Beispielhafte Zeichnungseintragungen

Die Eintragung erfolgt durch das Grundsymbol der Oberflächentoleranz mit Querlinie für materialabtragende Bearbeitung. Darüber ist das Symbol für profilhafte (Linie) oder flächenhafte (Parallelogramm) Oberflächenbeschaffenheit dargestellt. Die Messbedingungen und die Grenzwerte sind abhängig vom Bauteil, von den Applikationsbedingungen sowie vom Typ und der Ausführung des Radial-Wellendichtringes.

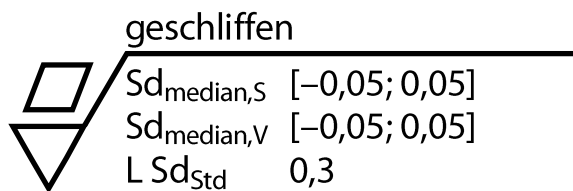
### 9.1 Beispielhafte Zeichnungseintragungen zu Rauheit und Welligkeit nach DIN EN ISO 21920



Allgemein: Sofern nicht anderweitig angegeben, ergeben sich die Messbedingungen und Filterparameter nach den Default-Einstellungen der Einstellungsklasse Sc3 in DIN EN ISO 21920-3. Zeile 5 ist ein Beispiel für eine abweichende Messbedingung.

1. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für die maximale Höhe des Rauheitsprofils beträgt $Rz = 1,0 \mu\text{m}$ , die obere Toleranzgrenze beträgt $Rz = 5,0 \mu\text{m}$ .
2. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für den arithmetischen Mittelwert der Höhe des Rauheitsprofils beträgt $Ra = 0,2 \mu\text{m}$ , die obere Toleranzgrenze beträgt $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ .
3. Zeile	Die obere Toleranzgrenze für die maximale Höhe je Abschnitt des Rauheitsprofils beträgt $Rzx = 6,3 \mu\text{m}$ .
4. Zeile	Die obere Toleranzgrenze für die Gesamthöhe des Welligkeitsprofils bezeichnet beträgt $Wt = 1,0 \mu\text{m}$ .
5. Zeile	Die obere Toleranzgrenze für die Gesamthöhe des Welligkeitsprofils über einen Messbereich von 10 mm beträgt $Wt = 1,3 \mu\text{m}$ .

## 9.2 Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur strukturbasierten Mikrodrall Analyse



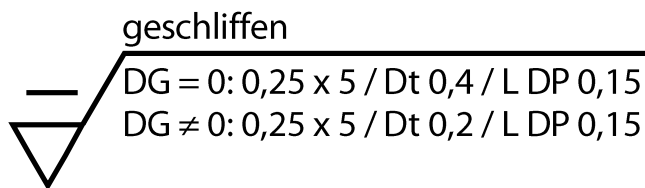
1. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für den Medianwinkel der Winkelverteilung beträgt $Sd_{\text{median},S} = -0,05^\circ$ , die obere Toleranzgrenze beträgt $Sd_{\text{median},S} = 0,05^\circ$ .
2. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für den Medianwinkel der Winkelvolumenverteilung beträgt $Sd_{\text{median},V} = -0,05^\circ$ , die obere Toleranzgrenze beträgt $Sd_{\text{median},V} = 0,05^\circ$ .
3. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für die Standardabweichung der Winkelverteilung beträgt $Sd_{\text{Std}} = 0,3^\circ$ .

## 9.3 Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur strukturbasierten Makrodrall Analyse



1. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für den Median der Strukturwinkel beträgt $SDY_{\text{median}} = -0,1^\circ$ , die obere Toleranzgrenze beträgt $SDY_{\text{median}} = 0,1^\circ$ .
2. Zeile	Die obere Toleranzgrenze für den Mittelwert der Strukturweiten beträgt $SDT_{\text{mean}} = 1,0 \mu\text{m}$ .
3. Zeile	Die untere Toleranzgrenze für den Variationskoeffizienten der Strukturweiten beträgt $\text{VarK}_{\text{SDB}} = 0,2$ .

## 9.4 Beispielhafte Zeichnungseintragungen zur Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7



1. Zeile	Ist die Gängigkeit $DG = 0$ , beträgt die obere Toleranzgrenze der Dralltiefe $Dt = 0,4 \mu\text{m}$ . Die untere Toleranzgrenze der Periodenlänge ist $DP = 0,15 \text{ mm}$ . Der Gültigkeitsbereich der Periodenlänge liegt zwischen $0,02 \text{ mm}$ bis $0,25 \text{ mm}$ .
2. Zeile	Ist die Gängigkeit $DG \neq 0$ , beträgt die obere Toleranzgrenze der Dralltiefe $Dt = 0,2 \mu\text{m}$ . Die untere Toleranzgrenze der Periodenlänge ist $DP = 0,15 \text{ mm}$ . Der Gültigkeitsbereich der Periodenlänge liegt zwischen $0,02 \text{ mm}$ bis $0,25 \text{ mm}$ .

*Anmerkung 1: Der Gültigkeitsbereich legt den Bereich der Periodenlängen fest, in dem die Drallkenngößen ausgewertet werden. Drallausprägungen mit Periodenlängen außerhalb dieses Bereichs werden nicht berücksichtigt.*

*Anmerkung 2: Der Gültigkeitsbereich wird in der Zeichnungseintragung durch einen Schrägstrich vor der oder den tolerierten DrallkenngroÙe(n) angegeben. Die kleinste auswertbare Periodenlänge beträgt  $0,02 \text{ mm}$ . Liegt der Beginn des Gültigkeitsbereichs an dieser unteren Grenze, wird in der Zeichnungseintragung nur die obere Begrenzung angegeben.*

*Anmerkung 3: Wenn kein Gültigkeitsbereich in der Zeichnung angegeben ist, gilt standardmäßig der Bereich von  $0,02$  bis  $0,4 \text{ mm}$ .*

## Literaturangaben

- [1] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN 3760: *Radial-Wellendichtringe*, Berlin. September 1996.
- [2] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN 3761-2: *Radial-Wellendichtringe für Kraftfahrzeuge - Anwendungshinweise*, Berlin: Beuth. November 1983.
- [3] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN 4760: *Gestaltabweichungen - Begriffe; Ordnungssystem*: Beuth. Juni 1982.
- [4] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 21920-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit*, Berlin: Beuth. Dezember 2022.
- [5] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 21920-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 1: Angabe der Oberflächenbeschaffenheit*, Berlin: Beuth. Dezember 2022.
- [6] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 21920-3: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 3: Spezifikationsoperatoren*, Berlin: Beuth. Dezember 2022.
- [7] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 25178-3: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 3: Spezifikationsoperatoren*: Beuth, 17.040.30. November 2012.
- [8] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 25178-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit*: Beuth, 17.040.30. Dezember 2016.
- [9] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 25178-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit*: Beuth, 17.040.30. September 2023.
- [10] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 8785: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenunvollkommenheiten; Begriffe, Definition und Kenngrößen*: Beuth. Oktober 1999.
- [11] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 3274: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nennenschaften von Tastschnittgeräten*: Beuth. April 1998.
- [12] **Deutsches Institut für Normung e.V.:** DIN EN ISO 16610-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung; Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte*: Beuth. November 2015.
- [13] **Mercedes-Benz:** Norm MBN 31007-7: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit Mess- und Auswerteverfahren zur Bewertung von drallreduzierten dynamischen Dichtflächen*. September 2008.
- [14] **Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA):** VDA 2006: *Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit; Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. Juli 2003.

- [15] **Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA):** VDA 2007: *Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit; Definitionen und Kenngrößen der dominanten Welligkeit*. Februar 2007.
- [16] **Rubber Manufacturers Association:** Technical Bulletin RMA OS-1-1: *Shaft Finish Requirements for Radial Lip Seals*. 2004.
- [17] **Bauer, F.:** *Federvorgespannte-Elastomer-Radial-Wellendichtungen. Grundlagen der Tribologie & Dichtungstechnik, Funktion und Schadensanalyse*, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, Springer Fachmedien Wiesbaden, - ISBN 978-3-658-32922-8.
- [18] **Baumann, M.:** *Abdichtung drallbehafteter Dichtungsgegenaufläachen - Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen*. Dissertation, 2017, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, - ISBN 978-3-936100-69-3.
- [19] **Baitinger, G.; Haas, W.:** *Strukturanalyse. Drall- und Mikrostrukturanalyse zur funktionalen Bewertung von Dichtungsgegenaufläachen*. Abschlussbericht FKM Vorhaben Nr. 285, AiF-Nr. 15628 N/1, Frankfurt am Main: FKM, 2011, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM).
- [20] **Baumann, M.; Bauer, F.:** *Strukturanalyse III. Anwendung von Strukturanalyse und Festlegung von Qualitätskriterien für die gezielte Bewertung von Dichtungsgegenaufläachen*. Abschlussbericht FKM Vorhaben Nr. 308, IGF-Nr. 18186 N, Frankfurt am Main: FKM, 2017, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM).
- [21] **Baumann, M.; Bauer, F.; Haas, W.:** *Strukturanalyse II. Ganzheitliche, funktionale Bewertung von Dichtungsgegenaufläachen mittels Strukturanalyse unter Einbeziehung der Wirkung von Strukturen auf die Förderwirkung der Welle*. Abschlussbericht FKM Vorhaben Nr. 298, IGF-Nr. 17138 N/1, Frankfurt am Main: FKM, 2015, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM).
- [22] **Engelfried, M.; Baumann, M.; Bauer, F.:** *3D-Makrodrall - Strukturbasierte 3D-Analyse von Makrodrall*. Forschungsheft 1471, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Abschlussbericht FVA Vorhaben Nr. 876 I, Frankfurt am Main, 2022.
- [23] **Seewig, J.; Hercke, T.:** *2nd Generation Lead Measurement*. XIX IMEKO World Congress, Lisbon, Portugal, September 6-11, 2009, 2009 - ISBN 9781615675937.
- [24] **Seewig, J.; Hercke, T.:** *Lead characterisation by an objective evaluation method*. Wear, Elsevier. 2009, 266 (5-6), S. 530–533.
- [25] **Hertzsch, A.; Kröger, K.; Großmann, M.:** *Schnelle optische Drallmessung*. tm – Technisches Messen. 2013, 80 (12).

# Anhang

A.1. Anhang zur strukturbasierten Mikrodrall Analyse .....	34
A.2. Anhang zur strukturbasierten Makrodrall Analyse .....	38
A.3. Anhang zur kombinierten strukturbasierten Drallanalyse .....	43
A.4. Anhang zur Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 .....	47
A.5. Anhang zur Drallprüfung nach der Fadenmethode.....	52

## A.1. Anhang zur strukturbasierten Mikrodrall Analyse

### A.1.1. Messstrategie der strukturbasierten Mikrodrall Analyse

Zur Messung von Mikrodrall sind hochauflösende, flächenhaft messende, optische Messverfahren erforderlich. Geeignete Messverfahren sind z. B. die Weißlichtinterferometrie oder die konfokale Mikroskopie.

Das Messraster zur Analyse von Mikrodrall besteht aus Messfeldern, die entlang der Wellenachse und über den Wellenumfang verteilt sind. Hierfür sind eine motorisierte Achse des Messgeräts in Achsrichtung der Welle sowie eine motorisierte Rotationsachse erforderlich.

Ein Messraster für die Erfassung von Mikrodrall auf der Dichtungsgegenlauffläche muss folgende Kriterien erfüllen:

- 1) Für eine statistisch fundierte Aussage müssen die Messfelder eine ausreichende Anzahl an mikroskopischen Schleifriefen enthalten. Die Anzahl ist abhängig von der Messfeldgröße und Messfeldanzahl.
- 2) Um Winkelfehler aufgrund schräger Einspannung der Welle zu erkennen und auszugleichen, sind mehrere Messungen in Achs- und Umfangsrichtung notwendig (Taufelkompensation).

Zur Erfüllung der Kriterien wird die Dichtungsgegenlauffläche mit einem 18x3 Messraster bestehend aus 18 Messfeldern in Umfangsrichtung im Abstand von  $\Delta\Phi = 20^\circ$  an jeweils drei Achspositionen im Abstand von  $\Delta X = 2$  mm zu messen.

*Hinweis: Die jüngsten Erkenntnisse im Zuge der Entwicklung des kombinierten Messraster für Drall zeigen auf, dass auch Messraster mit einer reduzierten Anzahl von Messfeldern eine ausreichende Genauigkeit erzielen.*

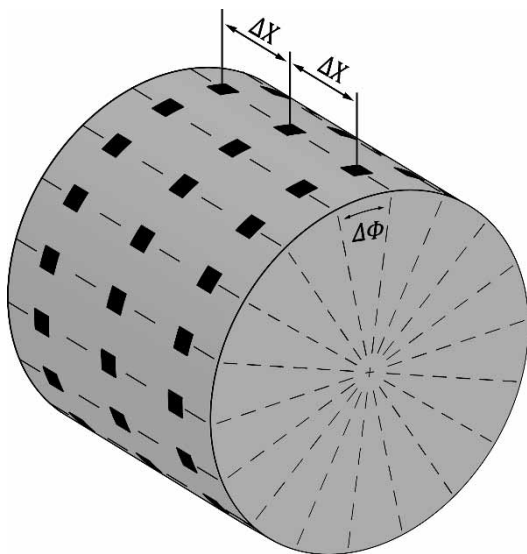


Abbildung 8: Messraster der strukturbasierten Mikrodrall Analyse

Tabelle 4: Messbedingungen zur strukturbasierten Mikrodrall Analyse

Messverfahren	optisch
Messfeldgröße	min. 500x 500 $\mu\text{m}$
Laterale Auflösung	< 1,5 $\mu\text{m}$
Vertikale Auflösung	< 10 nm

Tabelle 5: Messraster der strukturbasierten Mikrodrall Analyse

Anzahl Umfangspositionen	18
Abstand Umfangspositionen	$\Delta\Phi = 20^\circ$
Anzahl Achspositionen	3
Abstand Achspositionen	$\Delta X = 2$

## A.1.2. Beispielhafte Protokollansicht der strukturbasierten Mikrodrall Analyse

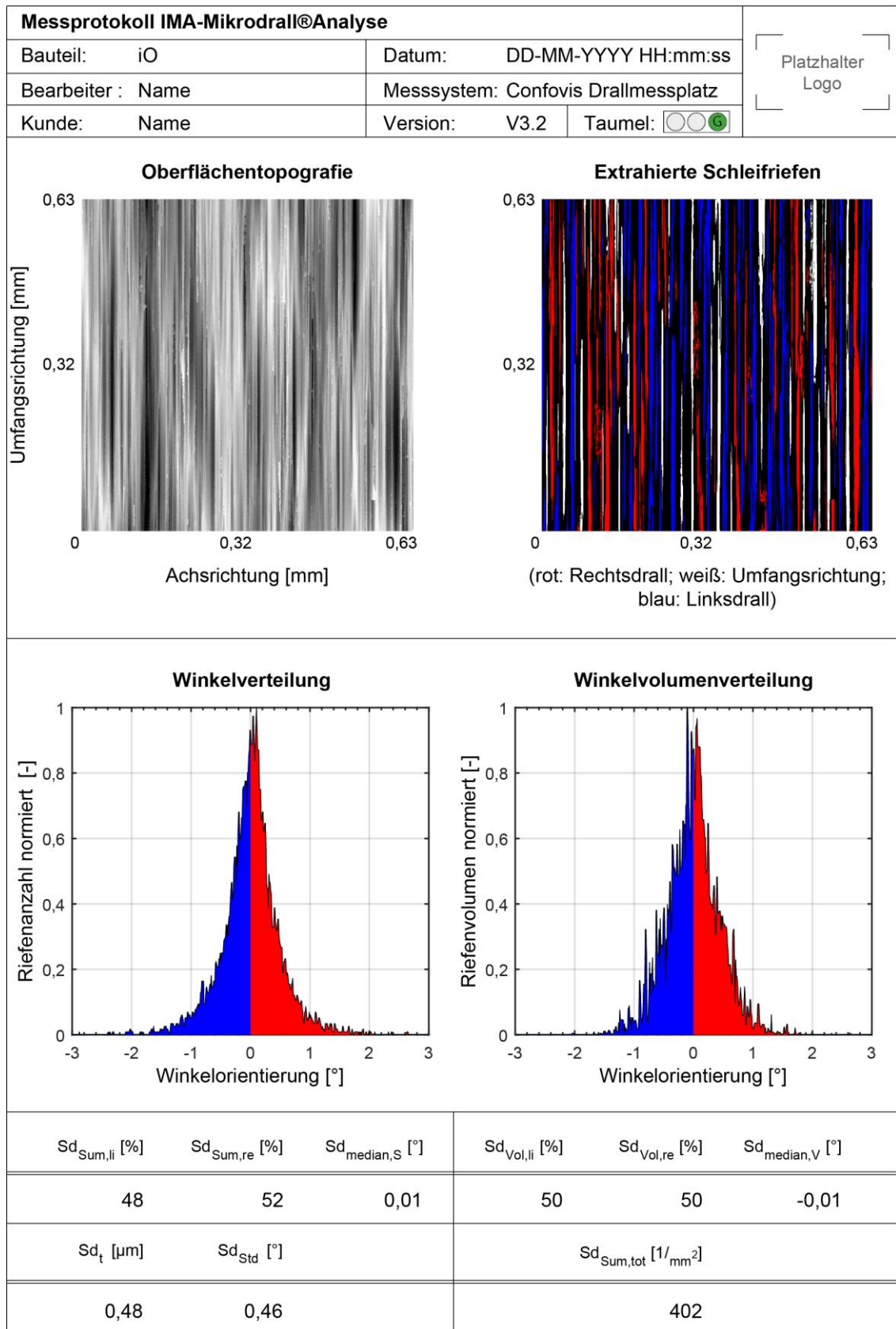


Abbildung 9: Protokoll der strukturbasierten Mikrodrall Analyse eines iO Beispiels

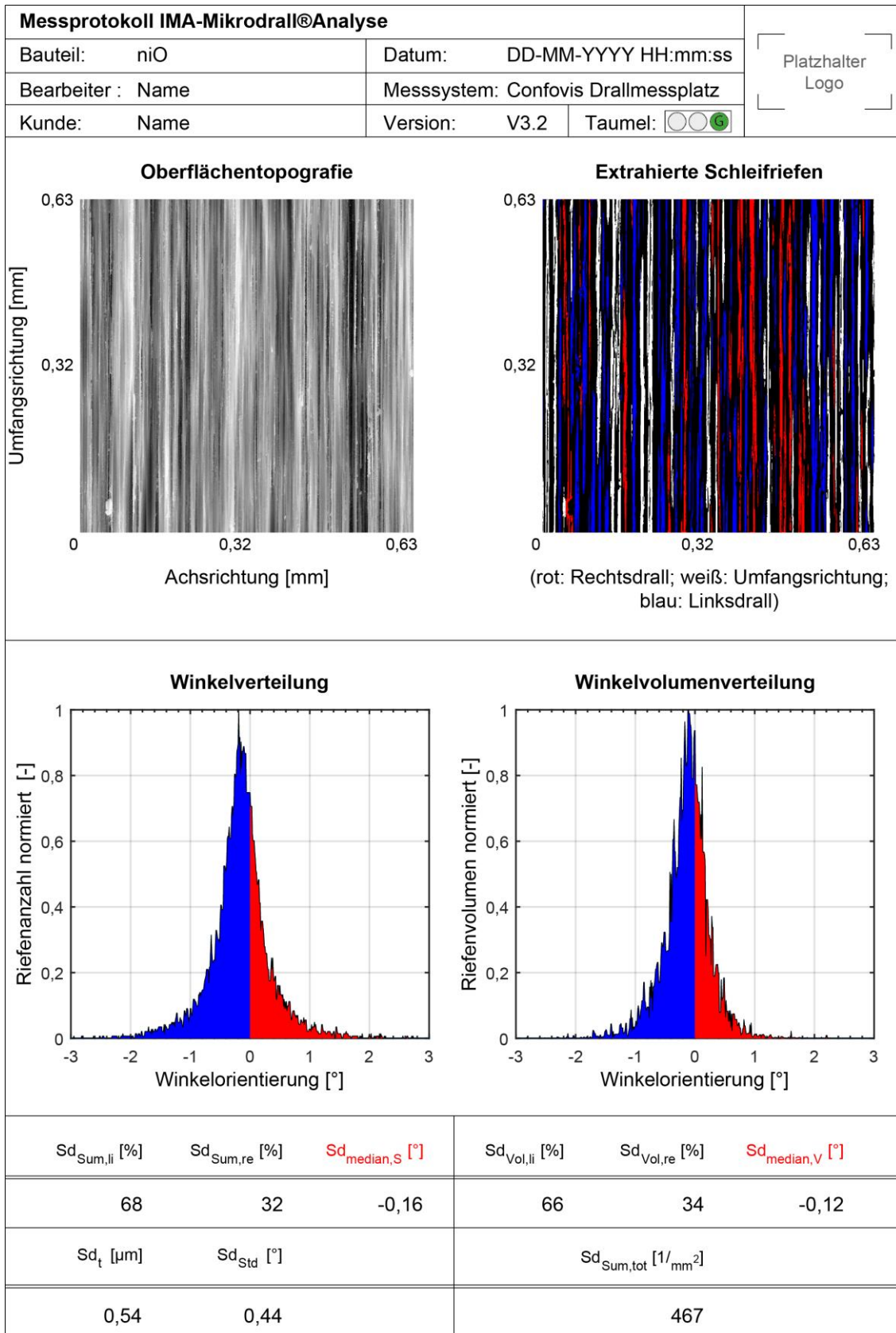


Abbildung 10: Protokoll der strukturbasierten Mikrodrall Analyse eines niO Beispiels

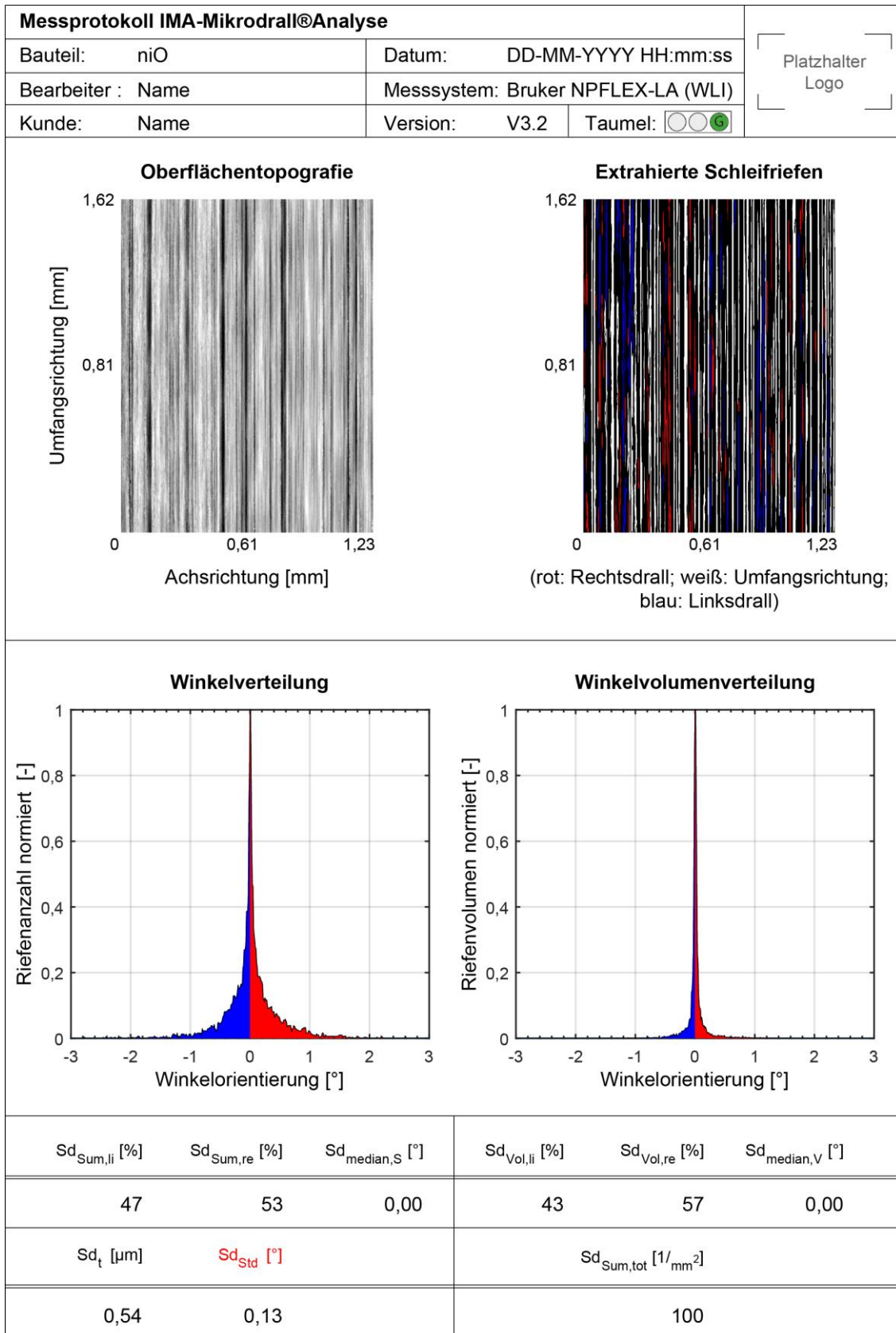


Abbildung 11: Protokoll der strukturbasierten Mikrodrall Analyse eines niO Beispiels

## A.2. Anhang zur strukturbasierten Makrodrall Analyse

### A.2.1. Messstrategie der strukturbasierten Makrodrall Analyse

Zur strukturbasierten Messung von Makrodrall sind hochauflösende, flächenhaft messende, optische Messverfahren erforderlich. Geeignete Messverfahren sind z. B. die Weißlichtinterferometrie oder die konfokale Mikroskopie.

Das Messraster zur strukturbasierten Analyse von Makrodrall besteht aus Messfeldern, die entlang der Wellenachse und über den Wellenumfang verteilt sind. Hierfür sind eine motorisierte Achse des Messgeräts in Achsrichtung der Welle sowie eine motorisierte Rotationsachse erforderlich.

Ein Messraster für die Erfassung von periodischem und aperiodischem Makrodrall auf der Dichtungsgegenlauffläche muss folgende Kriterien erfüllen:

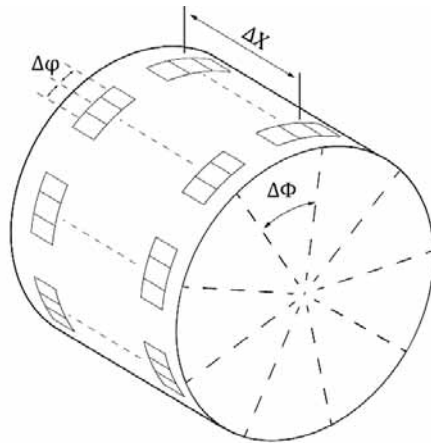
- 1) Für eine statistisch fundierte Aussage müssen die Messfelder eine ausreichende Anzahl an makroskopischen Schleifstrukturen enthalten. Die Anzahl ist abhängig von der Messfeldgröße und Messfeldanzahl.
- 2) Um die Verläufe der Schleifstrukturen in Umfangsrichtung und die Strukturorientierung genau beurteilen zu können, müssen die Oberflächentopographien eine ausreichende Länge in Umfangsrichtung aufweisen.
- 3) Um Winkelfehler aufgrund schräger Einspannung der Welle zu erkennen und auszugleichen, sind mehrere Messungen in Achs- und Umfangsrichtung notwendig (Taumelkompensation).

*Anmerkung: Die minimal erforderlichen Messfeldgrößen bei der strukturbasierten Makrodrall Analyse sind größer als bei der strukturbasierten Mikrodrall Analyse. Der Grund dafür ist, dass Makrodrall einen weiten Bereich an größeren Strukturgrößen abdeckt sowie unterschiedliche Strukturverläufe und Verteilungen auf der Oberfläche aufweisen kann.*

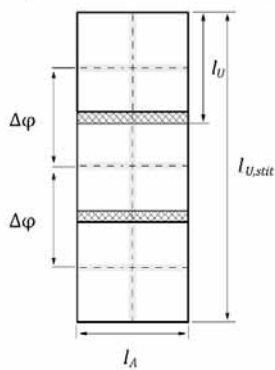
Zur Erfüllung der Kriterien wird empfohlen, die Dichtungsgegenlauffläche mit einem  $9 \times 2 \times 3$  Messraster bestehend aus neun Messposition in Umfangsrichtung im Abstand von  $\Delta\Phi = 40^\circ$  an jeweils zwei Achspositionen im Abstand von  $\Delta X = 4$  mm zu messen. An jeder Messposition werden drei jeweils umfänglich überlappende Messfelder aufgenommen. Um die erforderliche Messfeldgröße zu erreichen, kann messgeräteseitig ein Stitching von Einzelmessfeldern erfolgen.

Diese überlappenden Messfelder werden innerhalb der strukturbasierten Makrodrall Analyse zu einer gestitchten Topographie je Messposition zusammengesetzt und als solche ausgewertet. Der Taumel der Welle wird anhand aller Messfelder kompensiert.

Die Messbedingungen und das Messraster für die strukturbasierte Makrodrall Analyse wurden in einer umfangreichen empirischen Messrasteranalyse im Rahmen des FVA-Vorhabens FVA 876 I „3D-Makrodrall“ erarbeitet. Detaillierte und weiterführende Informationen finden sich im Abschlussbericht [22].



Messposition an der Stelle  $\Phi | X$



optional: vorab X-Y-Stitching seitens des Messgeräts





-  Einzelmessfeld (Größe abhängig von Objektiv)
-  Überlappung durch X-Y-Bewegung
-  Messfeld
-  Überlappung durch Rotation der Welle um  $\Delta\phi$

Abbildung 12: Empfohlenes Messraster der strukturbasierten Makrodrall Analyse

Tabelle 6: Messbedingungen zur strukturbasierten Makrodrall Analyse

Messverfahren	optisch
Laterale Auflösung	$\leq 1,5 \mu\text{m}$
Vertikale Auflösung	$< 10 \text{ nm}$

Tabelle 7: Messraster der strukturbasierten Makrodrall Analyse

Anzahl Umfangspositionen	9
Abstand zwischen Umfangspositionen	$\Delta\Phi = 40^\circ$
Anzahl Achspositionen	2
Abstand zwischen Achspositionen	$\Delta X = 4 \text{ mm}$
Anzahl der sich durch Rotation überlappenden Messfelder je Messpos.	3
Abstand der Messfelder an einer Messposition <sup>1</sup>	$\Delta\phi = \frac{360^\circ}{\pi \cdot d} \cdot 0,85 \cdot l_U$
Messfeldgröße in Achsrichtung	$l_A \geq 1,00 \text{ mm}$
Messfeldgröße in Umfangsrichtung	$l_U \geq 1,15 \text{ mm}$
Gestitchte Topographielänge in Umfangsrichtung	$l_{U,stit} \geq 3,00 \text{ mm}$

<sup>1</sup> Der Abstand in Umfangsrichtung, bzw. Winkel  $\Delta\phi$  zwischen den Stitchingmessfelder ist abhängig vom Durchmesser der Welle  $d$ , der Messfeldgröße in Umfangsrichtung  $l_U$  und einem definierten Überlappbereich.

## A.2.2. Beispielhafte Protokollansicht der strukturbasierten Makrodrall Analyse

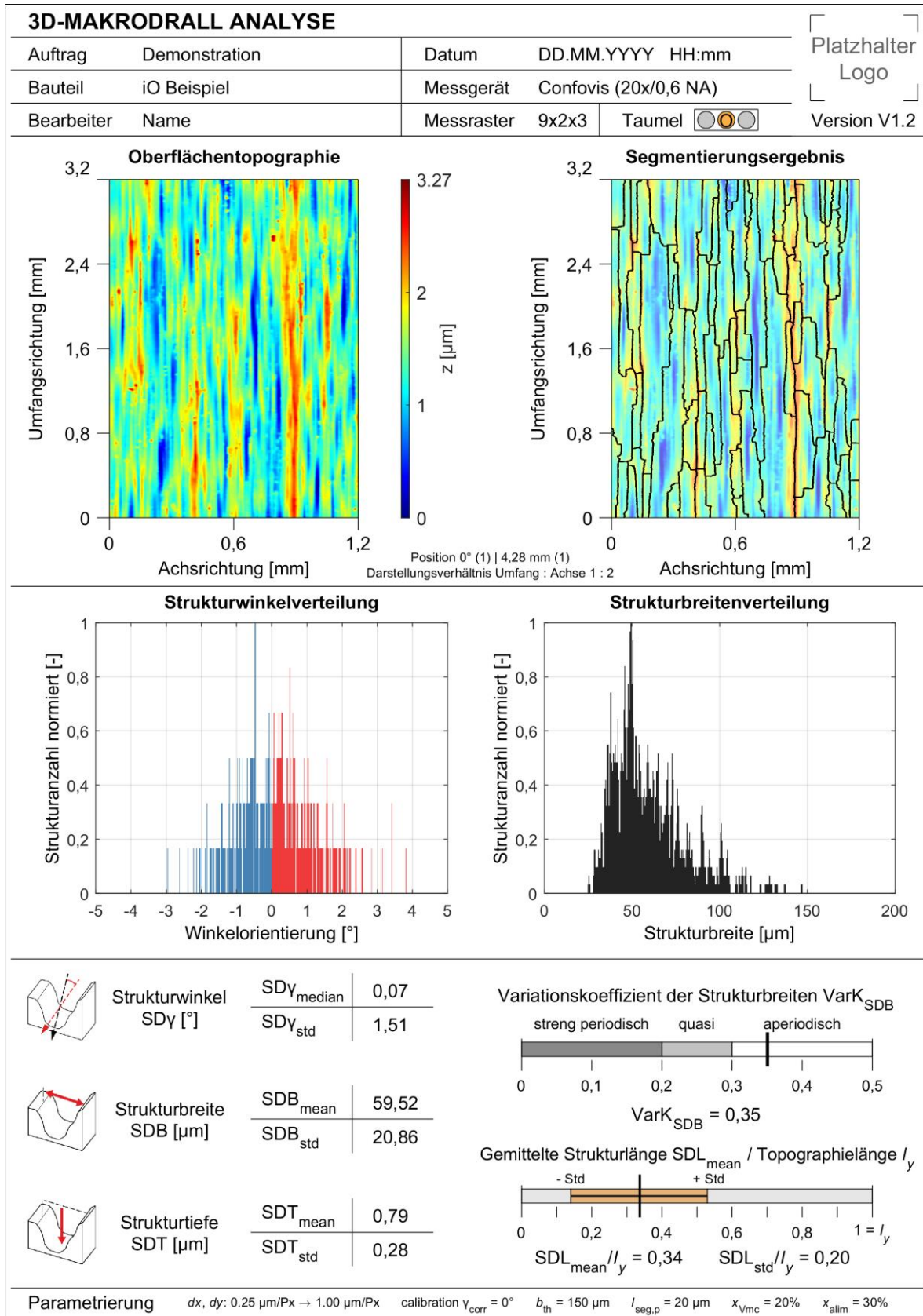


Abbildung 13: Protokoll der strukturbasierten Makrodrall Analyse eines iO Beispiels

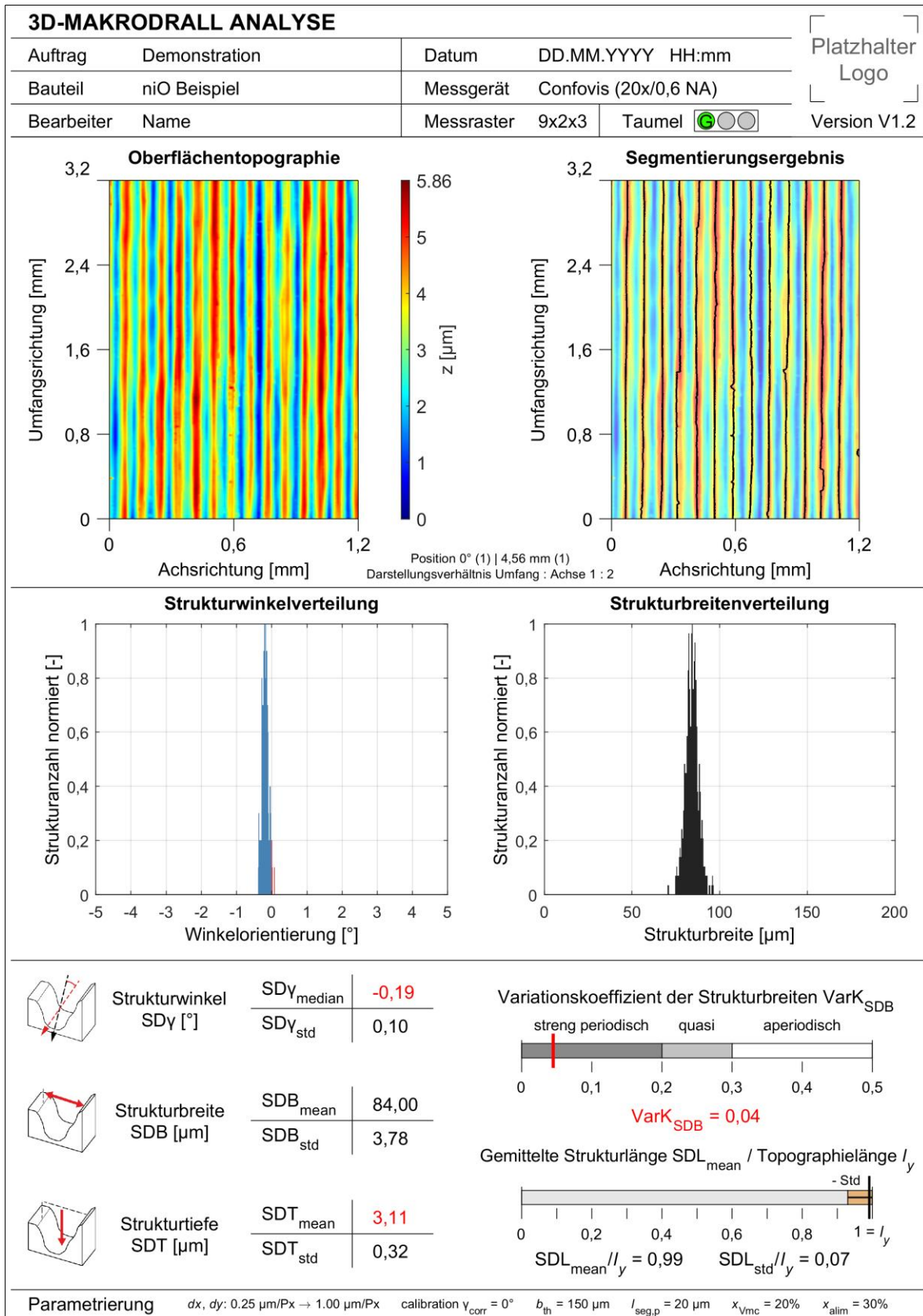


Abbildung 14: Protokoll der strukturbasierten Makrodrall Analyse eines niO Beispiels mit periodischem Makrodrall (geringe Verteilungsbreite der Strukturbreitenverteilung)

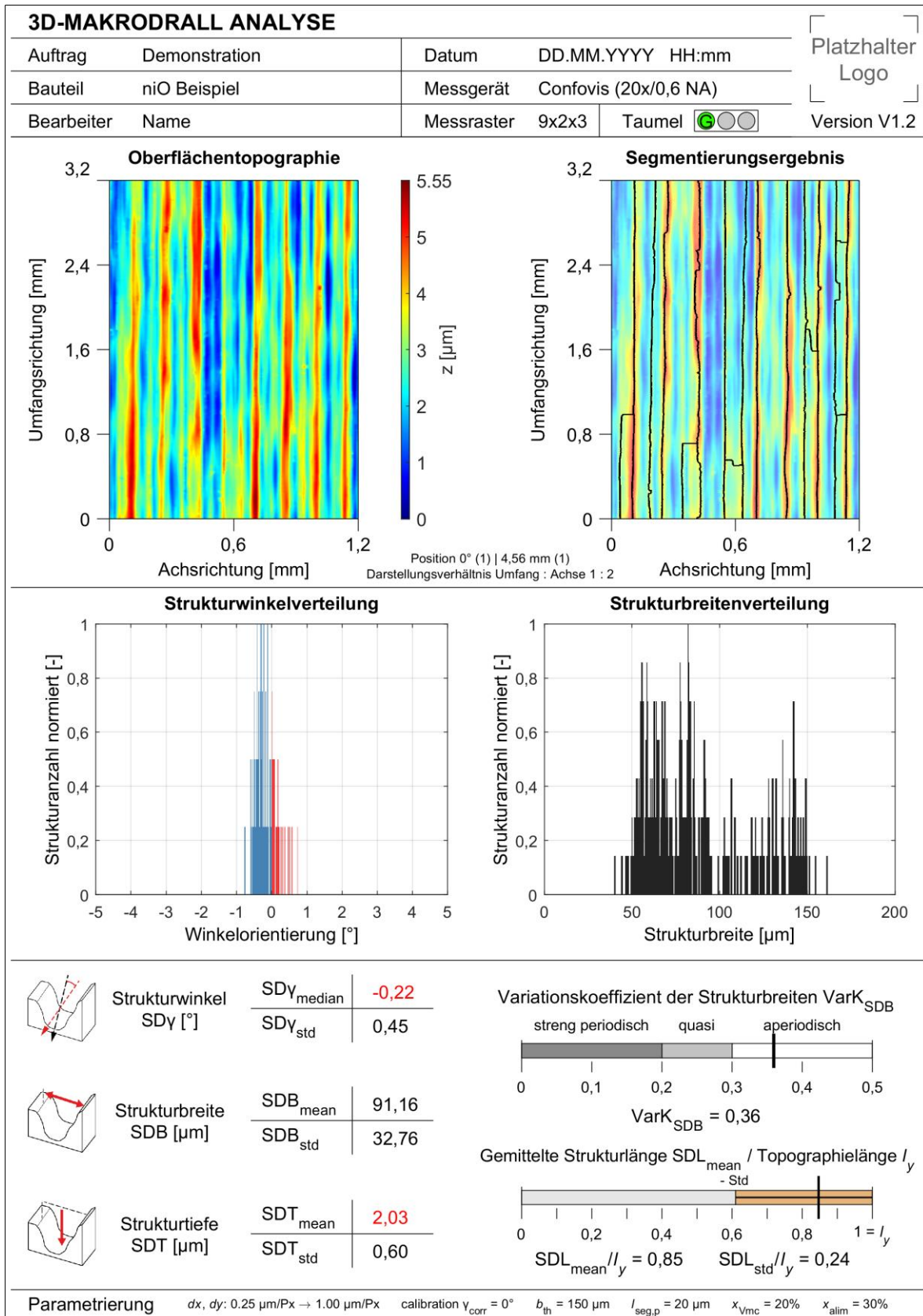


Abbildung 15: Protokoll der strukturbasierten Makrodrall Analyse eines niO Beispiels mit aperiodischem Makrodrall (große Verteilungsbreite bzw. mehrere Häufigkeitsmaxima in der Strukturbreitenverteilung)

## A.3. Anhang zur kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

### A.3.1. Messstrategie der kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

Die Messung zur kombinierten strukturbasierten Drallanalyse umfasst die Anwendung der strukturbasierten Mikrodrall Analyse und der strukturbasierten Makrodrall Analyse auf einen Messdatensatz. Hierbei wird die Analyse von Mikrodrall sowie periodischen und aperiodischen Makrodrall durch einen Messablauf und eine Auswertung ermöglicht. Die Darstellung aller Ergebnisse erfolgt in einem Gesamtprotokoll „Drall“.

Ein Messraster für die Erfassung von Mikrodrall und periodischem und aperiodischem Makrodrall auf der Dichtungsgegenauflfläche fasst die Messstrategie der strukturbasierten Mikrodrall Analyse (siehe Anhang A.1.1) und Makrodrall Analyse (siehe Anhang A.2.1) zusammen. Die folgenden Kriterien müssen erfüllt sein:

- 1) Für eine statistisch fundierte Aussage der strukturbasierten Mikrodrall Analyse müssen die Messfelder eine ausreichende Anzahl an mikroskopischen Schleifriefen enthalten. Die Anzahl ist abhängig von der Messfeldgröße und Messfeldanzahl.
- 2) Für eine statistisch fundierte Aussage der strukturbasierten Makrodrall Analyse müssen die Messfelder eine ausreichende Anzahl an makroskopischen Schleifstrukturen enthalten. Die Anzahl ist abhängig von der Messfeldgröße und Messfeldanzahl.
- 3) Um die Verläufe der Schleifstrukturen in Umfangsrichtung und die Strukturorientierung mit der strukturbasierten Mikrodrall Analyse genau beurteilen zu können, müssen die Oberflächentopographien eine ausreichende Länge in Umfangsrichtung aufweisen.
- 4) Um Winkelfehler aufgrund schräger Einspannung der Welle zu erkennen und auszugleichen, sind mehrere Messungen in Achs- und Umfangsrichtung notwendig (Taumelkompensation).

Zur Erfüllung der Kriterien wird empfohlen, die Dichtungsgegenauflfläche mit einem 9x2x3 Messraster bestehend aus 9 Messposition in Umfangsrichtung im Abstand von  $\Delta\Phi = 40^\circ$  an jeweils 2 Achspositionen im Abstand von  $\Delta X = 4 \text{ mm}$  zu vermessen. An jeder Messposition werden 3 jeweils umfänglich überlappende Messfelder aufgenommen. Um die erforderliche Messfeldgröße zu erreichen, kann messgeräteseitig ein Stitching von Einzelmessfeldern erfolgen.

Diese überlappenden Messfelder werden innerhalb der strukturbasierten Mikrodrall Analyse zu einer gestitchten Topographie je Messposition zusammengesetzt und als solche ausgewertet. Für die der strukturbasierten Mikrodrall Analyse reicht ein Messfeld pro Messposition aus, um statistisch genaue Ergebnisse zu erzielen. Der Taumel der Welle wird für beide Auswertungen anhand aller Messfelder kompensiert.

Die Messbedingungen und das Messraster für die kombinierte strukturbasierte Drallanalyse wurden im Rahmen des FVA-Vorhabens FVA 975 I „FVA Richtlinie Oberflächen/Drall – Wellendichtungen“ erarbeitet.

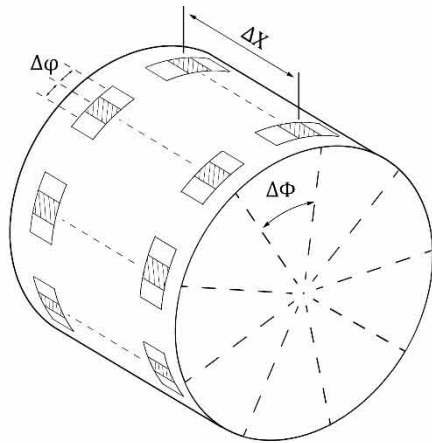


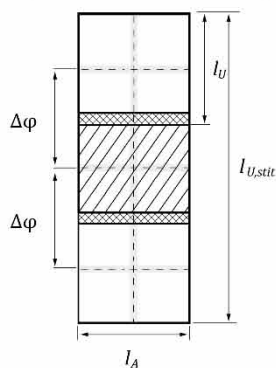
Tabelle 8: Messbedingungen der kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

Messverfahren	optisch
Laterale Auflösung	$\leq 1,5 \mu\text{m}$
Vertikale Auflösung	$< 10 \text{ nm}$

Tabelle 9: Empfohlenes Messraster der kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

Anzahl Umfangspositionen	9
Abstand zwischen Umfangspositionen	$\Delta\Phi = 40^\circ$
Anzahl Achspositionen	2
Abstand zwischen Achspositionen	$\Delta X = 4 \text{ mm}$
Anzahl der sich durch Rotation überlappenden Messfelder je Messpos.	3
Abstand der Messfelder an einer Messposition <sup>1</sup>	$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{\pi \cdot d} \cdot 0,85 \cdot l_U$
Messfeldgröße in Achsrichtung	$l_A \geq 1,00 \text{ mm}$
Messfeldgröße in Umfangsrichtung	$l_U \geq 1,15 \text{ mm}$
Gestitchte Topographielänge in Umfangsrichtung	$l_{U,stit} \geq 3,00 \text{ mm}$

Messposition an der Stelle  $\Phi | X$



optional: vorab X-Y-Stitching seitens des Messgeräts

- Einzelmessfeld (Größe abhängig von Objektiv)
- Überlappung durch X-Y-Bewegung
- Messfeld
- Überlappung durch Rotation der Welle um  $\Delta\varphi$
- Reduziertes Messraster für Mikrodrallanalyse

Abbildung 16: Empfohlenes Messraster der kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

<sup>1</sup> Der Abstand in Umfangsrichtung, bzw. Winkel  $\Delta\varphi$  zwischen den Stitchingmessfelder ist abhängig vom Durchmesser der Welle  $d$ , der Messfeldgröße in Umfangsrichtung  $l_U$  und einem definierten Überlappbereich.

### A.3.2. Beispielhafte Protokollansicht der kombinierten strukturbasierten Drallanalyse

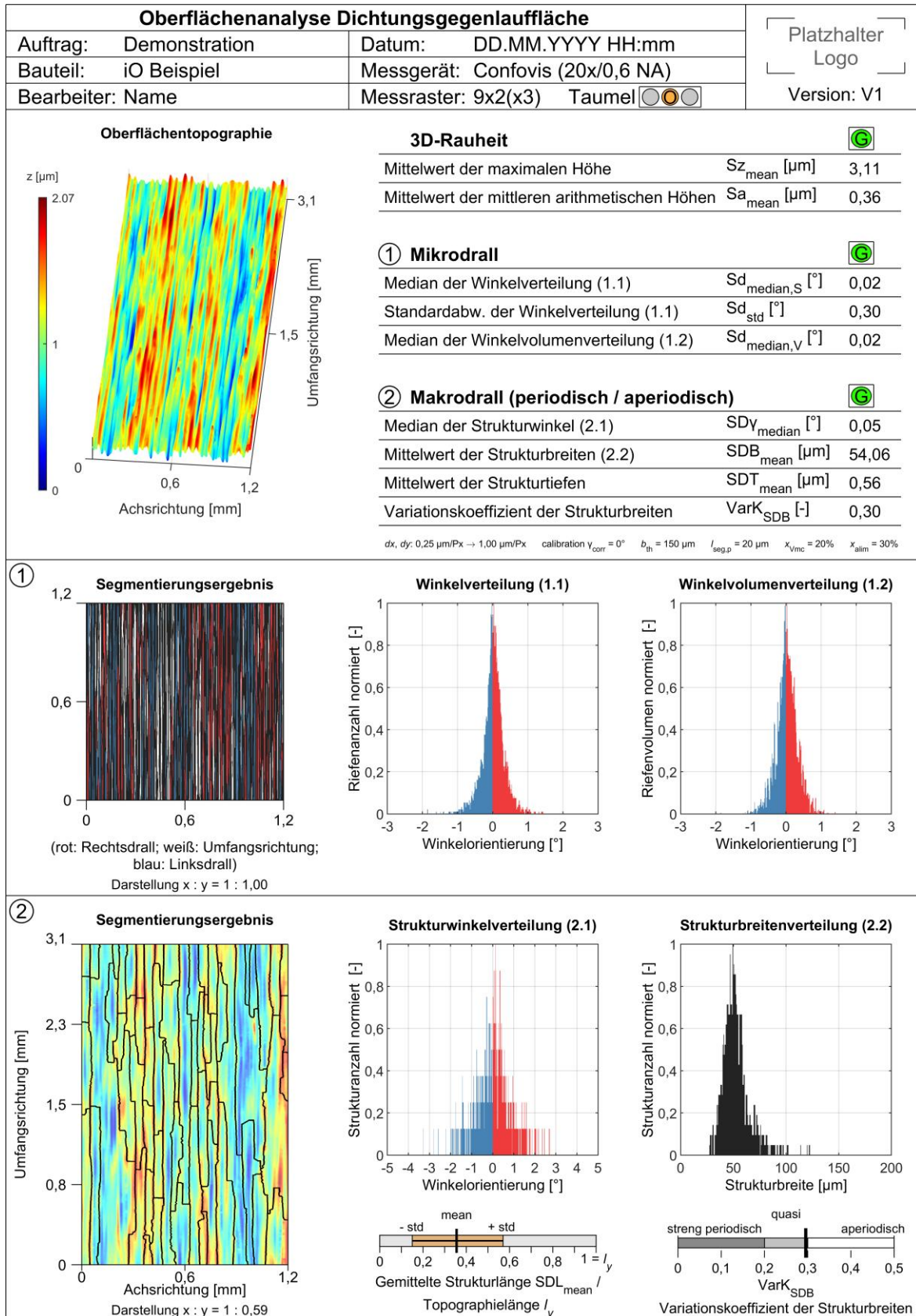


Abbildung 17: Gesamtprotokoll „Drall“ eines iO Beispiels

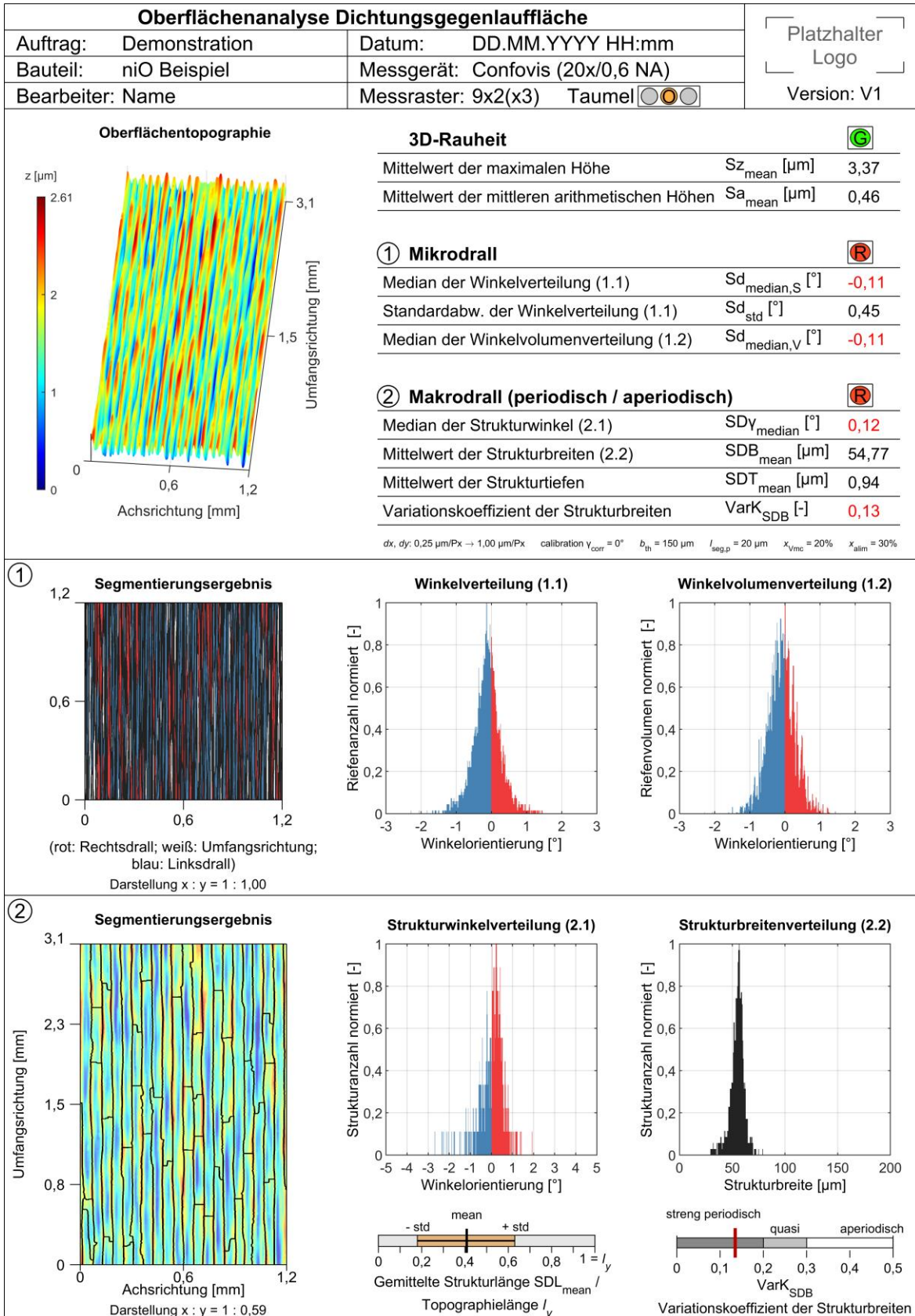


Abbildung 18: Gesamtprotokoll „Drall“ eines niO Beispiels

## A.4. Anhang zur Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

### A.4.1. Messstrategie der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Die Messung basiert auf axialen Oberflächenprofilen, die je 72-mal in einem  $360^\circ$  ( $5^\circ$  Schritte) und in einem  $36^\circ$  ( $0,5^\circ$  Schritte) Messraster gleichmäßig verteilt achsparallel gemessen werden, siehe Abbildung 19. Die Parameter der Messraster sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Die 72 Einzelprofile werden zu einer Topographie zusammengesetzt. Mittels einer Frequenzanalyse (FFT) werden periodische Makrodrallstrukturen identifiziert und mathematisch angenähert. Aus der mathematischen Näherung lassen sich charakteristische Makrodrallkenngrößen der Dichtungslaufläche bestimmen, siehe Abbildung 20.

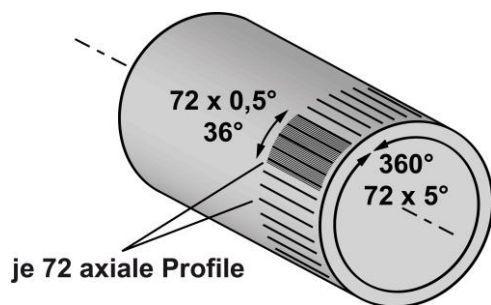
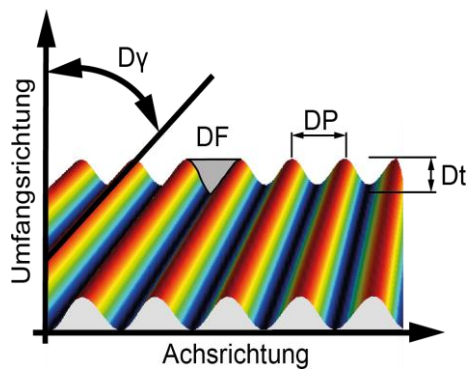


Abbildung 19: Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Tabelle 10: Messraster der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Profilmessungen je Messraster ( $360^\circ/36^\circ$ )	72
Axiale Messstrecke	2 mm
Schrittweite in Umfangsrichtung bei $360^\circ$ -Messung	$5^\circ$
Schrittweite in Umfangsrichtung bei $36^\circ$ -Messung	$0,5^\circ$



Dy	Drallwinkel
DP	Periodenlänge
Dt	Dralltiefe
DF	Förderquerschnitt

Abbildung 20: Mathematisch approximiertes Oberflächenprofil und Drallkenngrößen nach MBN 31007-7

## A.4.2. Beispielhafte Projektansicht der Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7

Studienobjekt-Infos	
Name:	iO 360°
NMP-Verhältnis:	0.00% (0 Pkte)

Platzhalter  
Logo

Parameter	Wert	Einheit	Parameter	Wert	Einheit
Durchmesser	50.0	mm	Periodenlänge	DP	0.274 mm
Messstrecke	2.00	mm	Theoretischer Förderquerschnitt	DF	19.5 $\mu\text{m}^2$
Maximale Wellenlänge	0.400	mm	Theoretischer Förderquerschnitt pro Umdrehung	DFu	0.00 $\mu\text{m}^2/\text{U}$
Gängigkeit	DG	0.00	Prozentuale Auflagelänge	DLu	100 %
Dralltiefe	Dt	0.141 $\mu\text{m}$	Drallwinkel	Dy	0.00 °

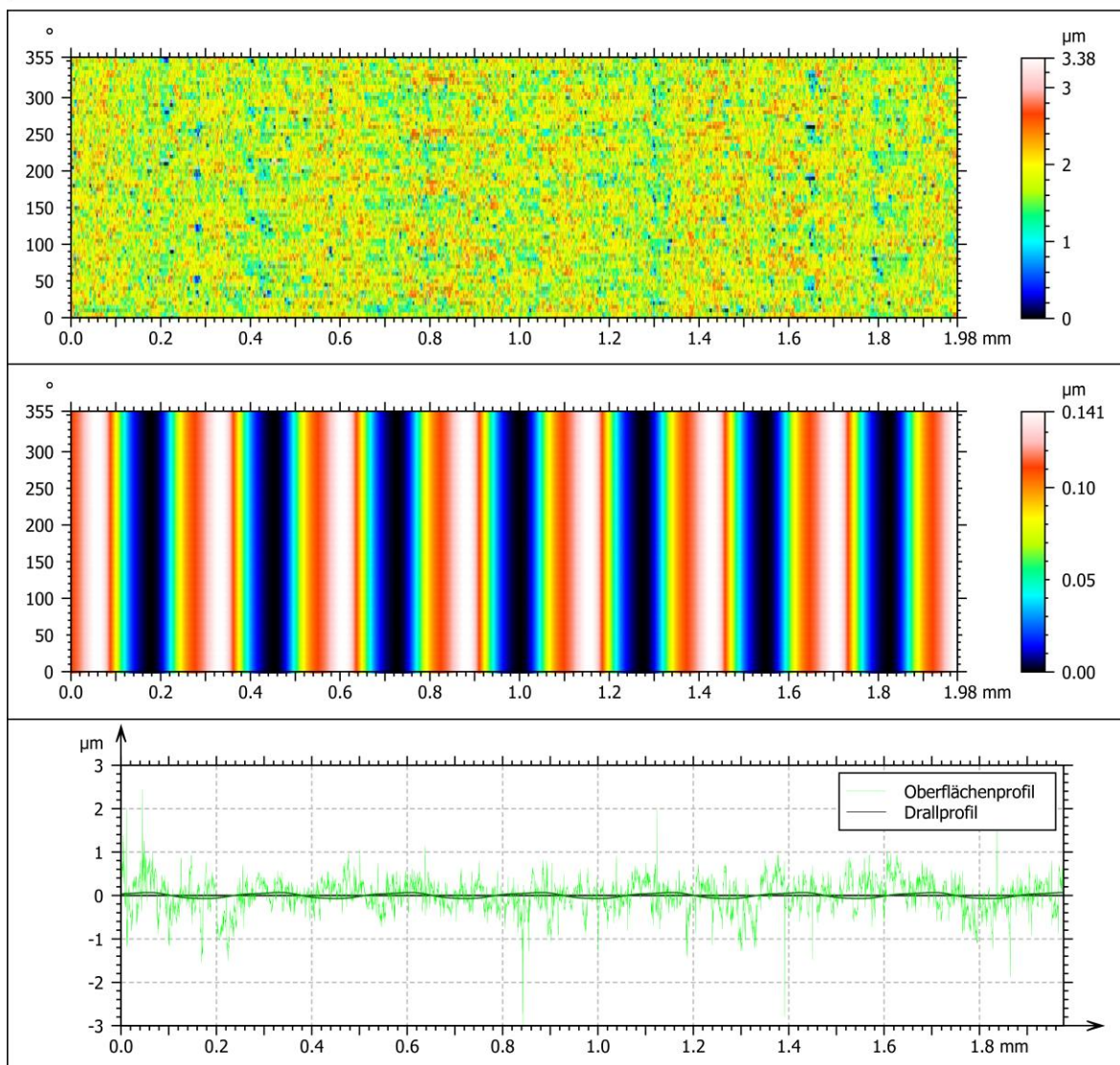


Abbildung 21: Protokoll der 360°-Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 eines iO Beispiels (ausgewertet mit HommelMap Premium Version 7.4.9745 2021/06/06)

Studienobjekt-Infos	
Name:	iO 36°
NMP-Verhältnis:	0.00 % (0 Pkte)

Platzhalter  
Logo

Parameter	Wert	Einheit	Parameter	Wert	Einheit
Durchmesser	50.0	mm	Periodenlänge	DP	0.274 mm
Messstrecke	2.00	mm	Theoretischer Förderquerschnitt	DF	21.3 $\mu\text{m}^2$
Maximale Wellenlänge	0.400	mm	Theoretischer Förderquerschnitt pro Umdrehung	DFu	0.00 $\mu\text{m}^2/\text{U}$
Gängigkeit	DG	0.00	Prozentuale Auflagelänge	DLu	100 %
Dralltiefe	Dt	0.153 $\mu\text{m}$	Drallwinkel	Dy	0.00 °

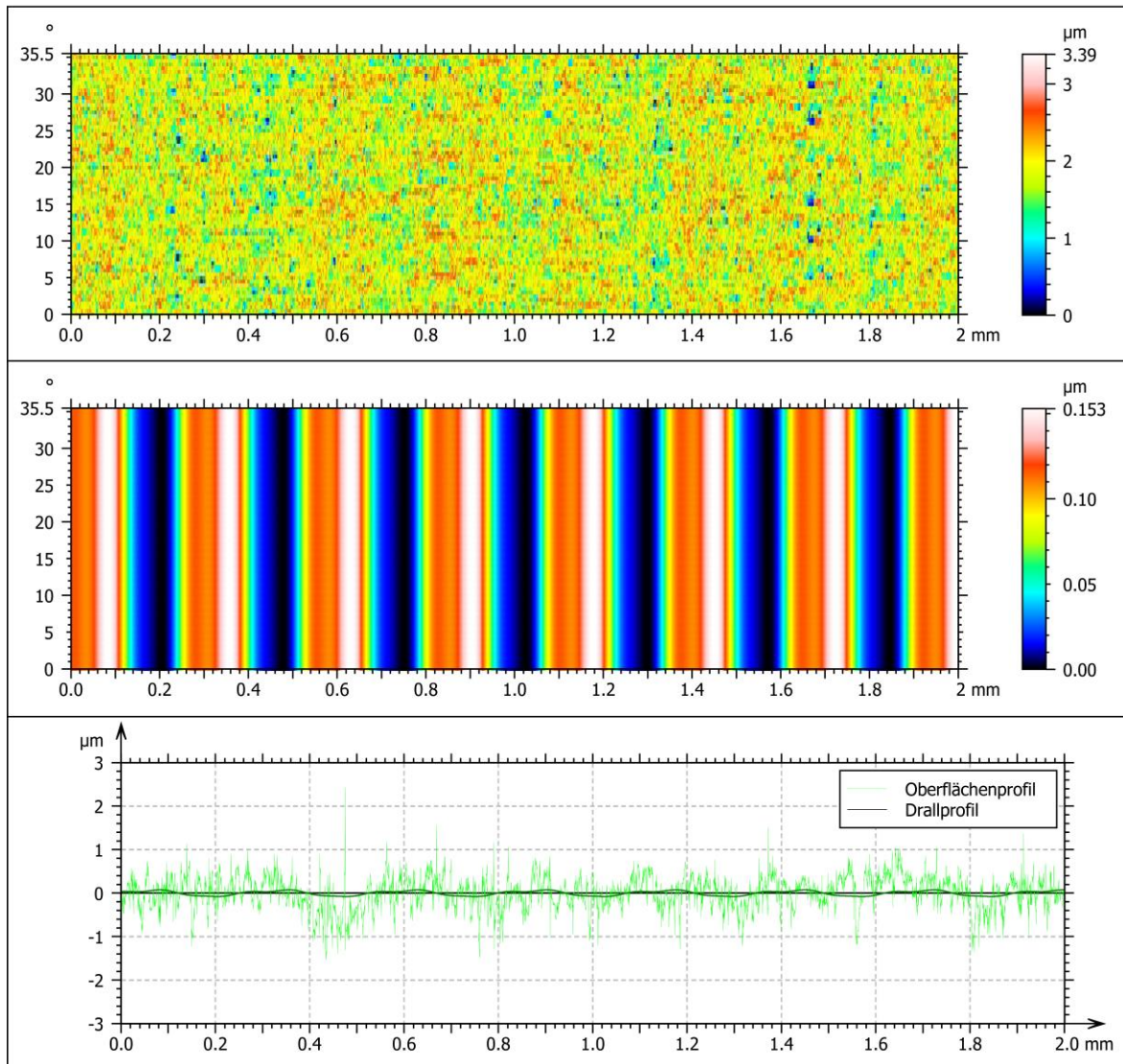


Abbildung 22: Protokoll der 36°-Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 eines iO Beispiels (ausgewertet mit HommelMap Premium Version 7.4.9745 2021/06/06)

Studienobjekt-Infos	
Name:	niO 360°
NMP-Verhältnis:	0.00%(0 Pkte)

Platzhalter  
Logo

Parameter	Wert	Einheit	Parameter	Wert	Einheit
Durchmesser	50.0	mm	Periodenlänge	DP	0.135 mm
Messstrecke	2.00	mm	Theoretischer Förderquerschnitt	DF	106 $\mu\text{m}^2$
Maximale Wellenlänge	0.400	mm	Theoretischer Förderquerschnitt pro Umdrehung	DFu	1059 $\mu\text{m}^2/\text{U}$
Gängigkeit	DG	10.0	Prozentuale Auflagelänge	DLu	22.9 %
Dralltiefe	Dt	1.44 $\mu\text{m}$	Drallwinkel	Dy	0.492 °

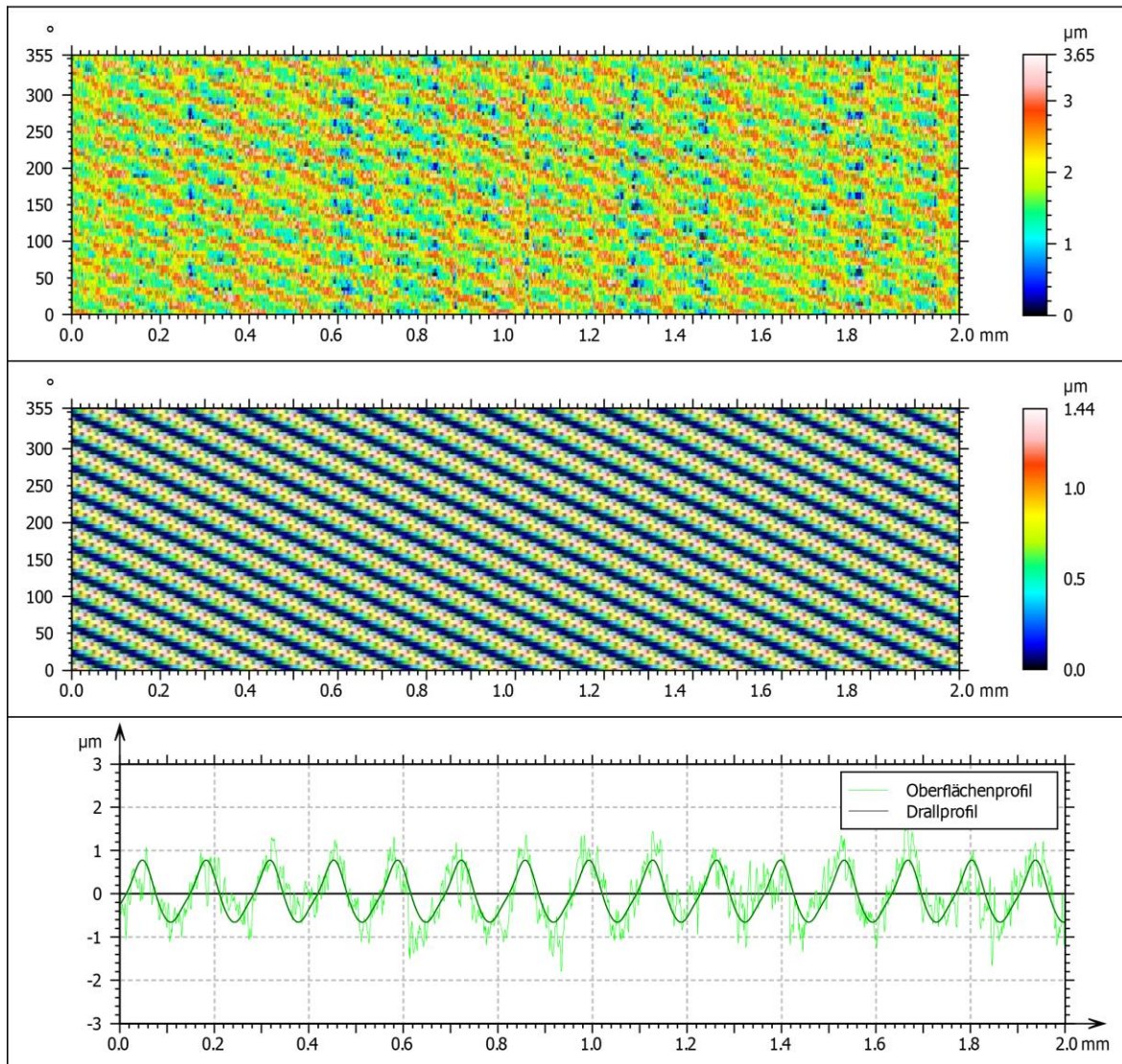
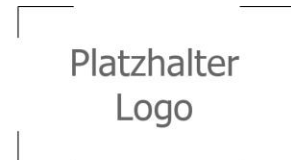


Abbildung 23: Protokoll der 360°-Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 eines niO Beispiels mit periodischem Makrodrall ((ausgewertet mit HommelMap Premium Version 7.4.9745 2021/06/06)

Studienobjekt-Infos	
Name:	niO 36°
NMP-Verhältnis:	0.00 % (0 Pkte)



Parameter	Wert	Einheit	Parameter	Wert	Einheit
Durchmesser	50.0	mm	Periodenlänge	DP	0.135 mm
Messstrecke	2.00	mm	Theoretischer Förderquerschnitt	DF	105 $\mu\text{m}^2$
Maximale Wellenlänge	0.400	mm	Theoretischer Förderquerschnitt pro Umdrehung	DFu	1046 $\mu\text{m}^2/\text{U}$
Gängigkeit	DG	10.0	Prozentuale Auflagelänge	DLu	22.1 %
Dralltiefe	Dt	1.41 $\mu\text{m}$	Drallwinkel	Dy	0.492 °

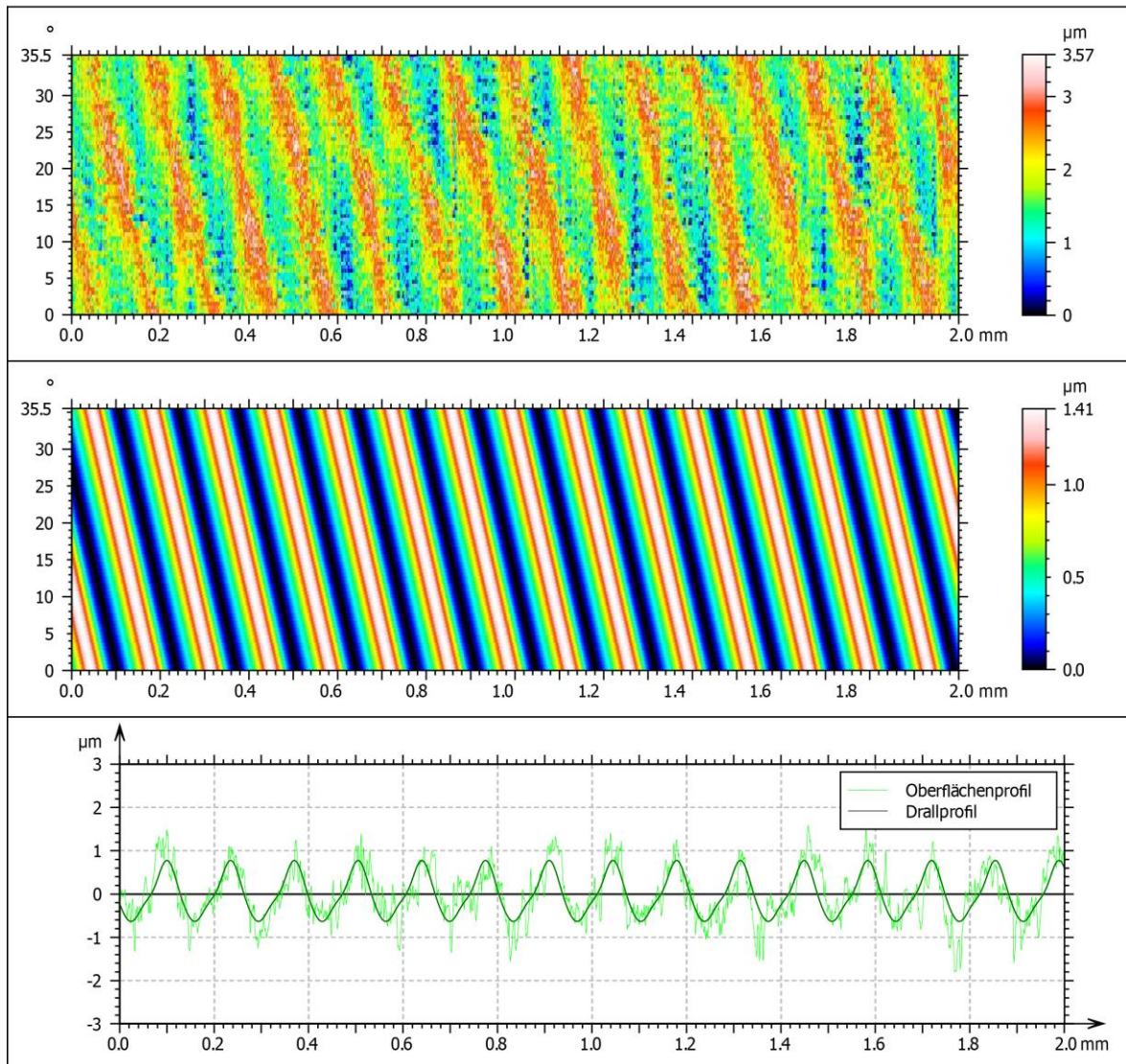


Abbildung 24: Protokoll der 36°-Makrodrallauswertung nach MBN 31007-7 eines niO Beispiels mit periodischem Makrodrall (ausgewertet mit HommelMap Premium Version 7.4.9745 2021/06/06)

## A.5. Anhang zur Drallprüfung nach der Fadenmethode

Es existieren keine allgemein genormten Spezifikationen für die Durchführung der Fadenmethode. Es bestehen eine Vielzahl verschiedener Richtlinien und Unternehmens-Werknormen, welche z. B. verschiedene Fäden, Drehzahlen und Gewichte vorgeben. Innerhalb dieser FVA Richtlinie werden folgende Spezifikationen empfohlen:

Tabelle 11: Empfohlene Spezifikationen zur Fadenmethode

Fadentyp:	Baumwollfaden Mercifil 40
Welle:	Trocken
Zeitdauer:	10 s je Drehrichtung
Drehzahl:	60 U/min
Gewicht:	35 g
Umschlingungswinkel Faden - Welle:	220 – 240°

*Anmerkung: Insbesondere bei größeren Wellendurchmessern kann es vorkommen, dass der Faden und das angehängte Gewicht in Umfangsrichtung mitgenommen werden. Es wird empfohlen, in diesem Fall das Gewicht zu erhöhen.*

Der schematische Aufbau der Drallprüfung nach der Fadenmethode ist in Abbildung 25 dargestellt. Abbildung 26 zeigt ein Beispiel einer vergrößerten Aufnahme des Fadens auf der Wellenoberfläche

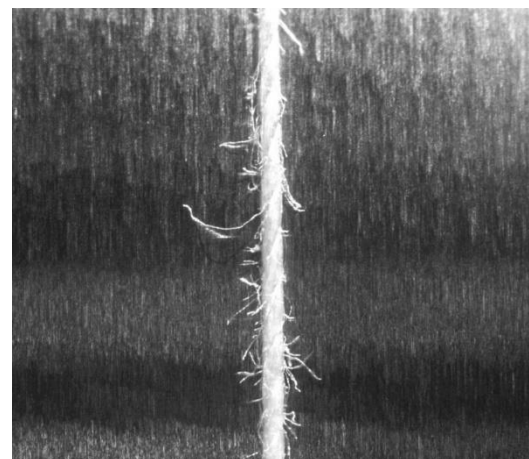
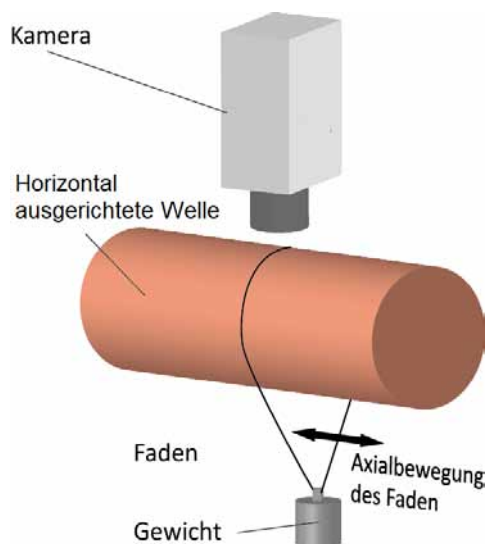


Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Drallprüfung nach der Fadenmethode

Abbildung 26: Faden auf der Wellenoberfläche