



## WaveSensor & WaveMaster<sup>®</sup>

Flexible und präzise  
Wellenfrontmessung





# Optik ist unsere Leidenschaft

---

TRIOPTICS entwickelt und produziert weltweit das umfangreichste Spektrum optischer Mess- und Fertigungstechnik für die Entwicklung, die Qualitätskontrolle und die Produktion von Linsen, Objektiven und Kameramodulen.





# WaveSensor & WaveMaster®

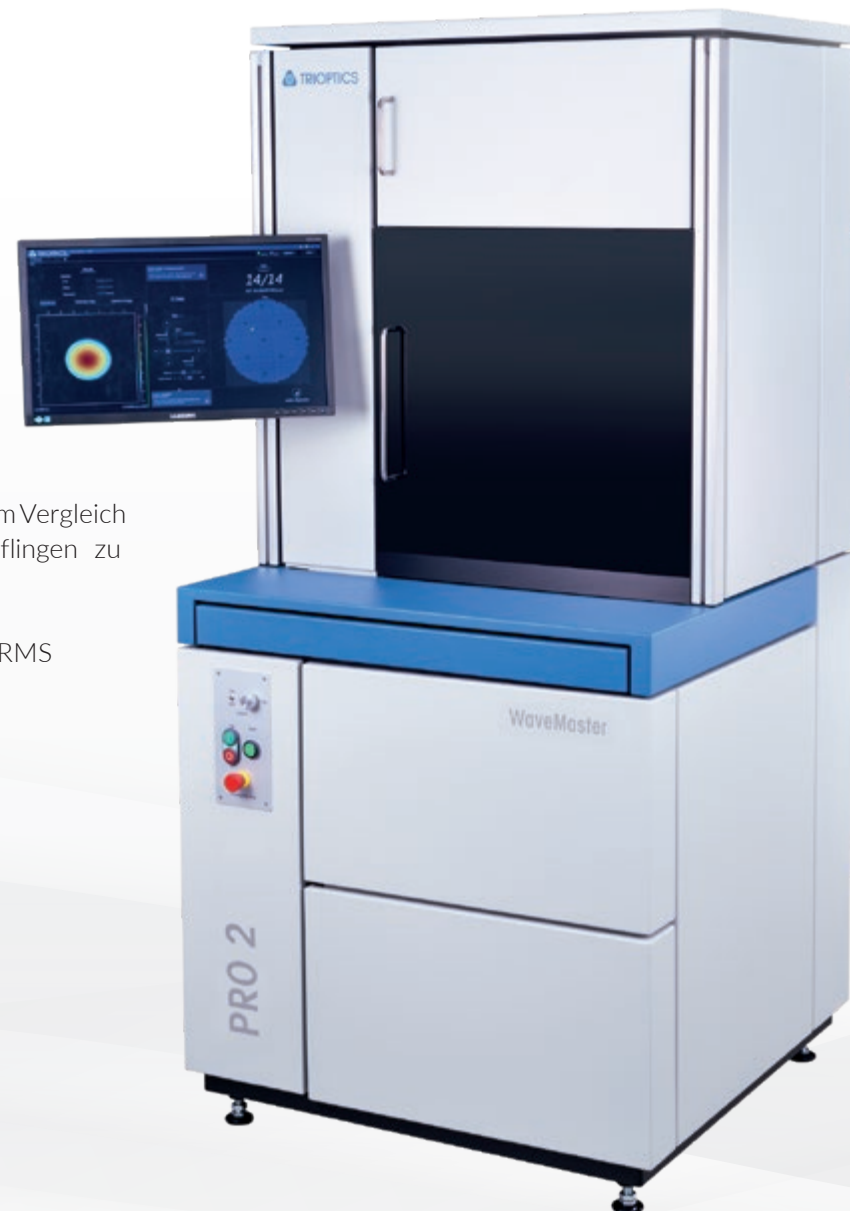
# Das Messprinzip

## Ortsaufgelöste Qualitätsprüfung über die gesamte Prüflingsapertur

Die Anforderungen an die Qualität von Optiken steigen stetig. So nehmen auch die Aufwendungen zur Entwicklung des Linsendesigns zu und die theoretischen Berechnungen der Abbildung – axial und außeraxial – werden anspruchsvoller.

Um die Umsetzung der aufwendigen optischen Designs nach der Herstellung sicher stellen zu können, muss auch eine qualifizierte Messtechnik genutzt werden.

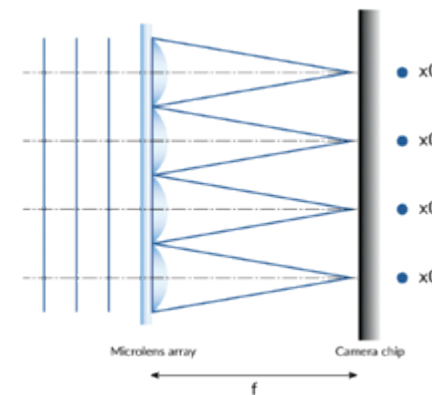
Hierzu eignet sich insbesondere die Wellenfrontprüfung, die die Abbildungsqualität ortsaufgelöst, das heißt über alle Feldwinkel, und über die gesamte Prüflingsapertur bestimmt. Damit ergibt sich, anders als bei der klassischen MTF-Prüfung, nicht nur ein punktuelles Maß für die Qualität, sondern ein kontinuierlicher Abgleich über die gesamte Apertur.



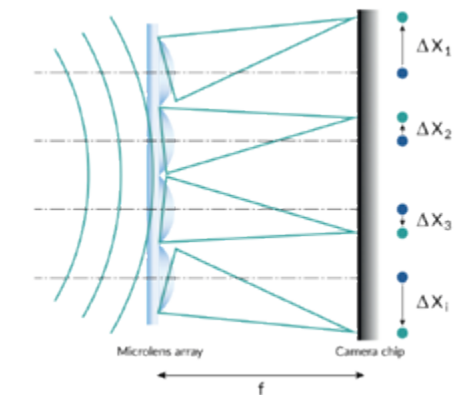
Die Wellenfrontmessung liefert Ergebnisse im Vergleich zu den Designdaten oder zu Masterprüflingen zu folgenden Parametern:

- Größe der Wellenfront in PV und/oder RMS
- Zernike Koeffizienten
- PSF (Punktbildfunktion)
- Abbildungsqualität mittels MTF (Modulationsübertragungsfunktion)
- Strehl-Verhältnis
- Keilwinkel
- Brennweite (optional)

TRIOPTICS realisiert die Wellenfrontmessung über einen Shack-Hartmann Sensor. Dieser besteht aus einem Mikrolinsen-Array, in dessen Brennebene eine Kamera angeordnet ist. Eine Wellenfront, die auf die Linsen eines Arrays trifft, wird in viele kleine Bereiche zerlegt. Eine durch einen Prüfling ausgelöste Aberration führt zu einer Neigung der Wellenfront. Diese ist mit einer messbaren Verschiebung der einzelnen Brennpunkte verbunden.



A) Planparallele Wellenfront erzeugt äquidistante Bildpunkte auf dem Kamerachip



B) Aberrierte und somit geneigte Wellenfront führt zu einer Verschiebung der Bildpunkte. Durch die Größe der Verschiebung wird die Wellenfront rekonstruiert

Die gemessene Wellenfront wird mittels Zernike-Polynomen analysiert. Dies ermöglicht eine numerische Darstellung aller Abbildungsfehler des Prüflings. Hierzu gehören z. B. sphärische Aberrationen, Astigmatismus und Koma. Abbildungsfehler lassen sich im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückführen: das Linsendesign (symmetrische Aberrationen) und/oder Fertigungsfehler (asymmetrische Aberrationen).

Zur Charakterisierung der Auswirkungen von Aberrationen dienen auch die Punktbildfunktion (PSF), die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) oder das Strehl-Verhältnis. Diese Größen werden ebenfalls aus der Wellenfront abgeleitet.

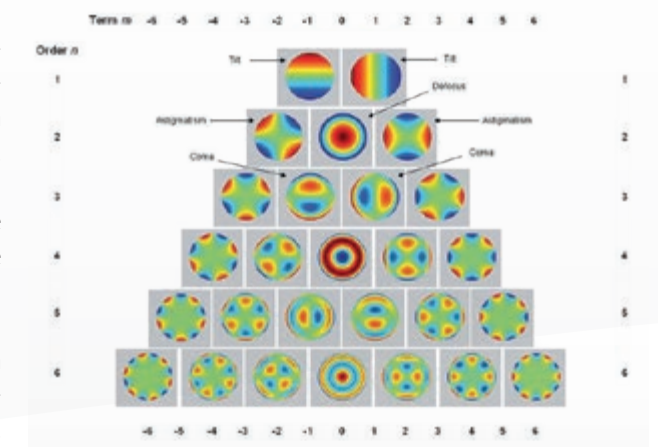
## Messungen in zwei Methoden

### Reflexion

Messungen in Reflexion liefern Informationen über die Oberflächentopographie des Prüflings zur Ermittlung reiner Formabweichungen einzelner Flächen.

### Transmission

Die Messung in Transmission liefert Informationen über die optischen Eigenschaften der gesamten Linse bzw. des gesamten Linsensystems. Dabei wird die gemessene Wellenfront sowohl durch die Oberflächen als auch durch den Brechungsindex der verwendeten Materialien beeinflusst.



Zernike-Polynome bis zur 6. Ordnung

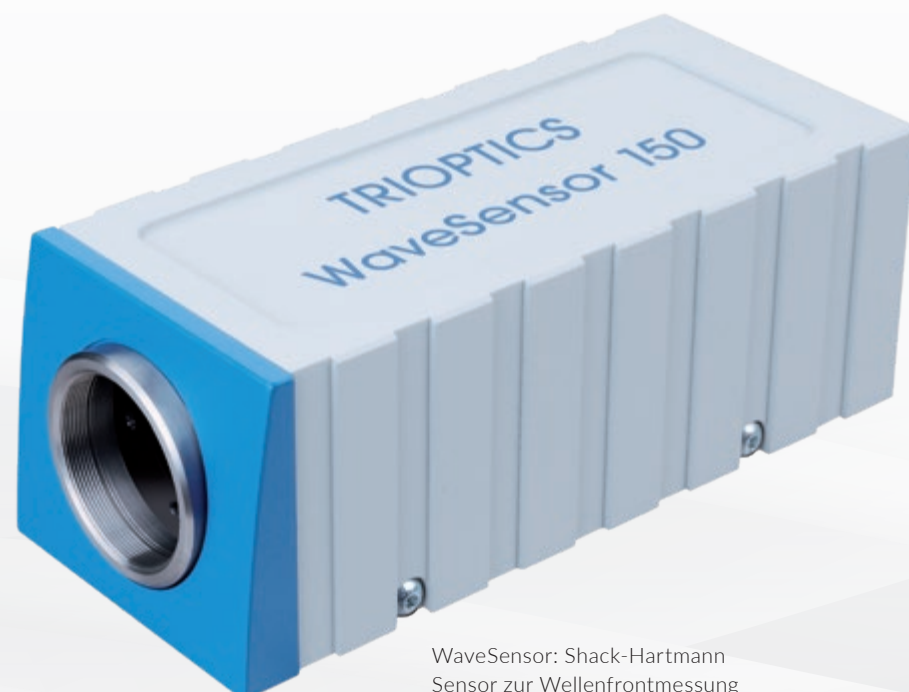
## WaveSensor 150

Das Kernstück aller Wellenfrontmessungen bei TRIOPTICS ist der WaveSensor. Dieser Shack-Hartmann Sensor überzeugt durch seine kompakte und robuste Bauweise, v dass er sowohl einzeln auf einer optischen Bank als auch integriert in TRIOPTICS Wellenfrontmesssystemen eingesetzt wird.

Je nach Aufbau dient er zur Messung und Analyse sphärischer und asphärischer als auch planer Optiken in Reflexion und/oder Transmission.

### Der WaveSensor 150 bietet:

- Maximale Dynamik bis zu  $2000 \lambda$ , Genauigkeit bis zu  $< \lambda/20$  (RMS) und eine Wiederholbarkeit von  $\lambda/200$  (RMS)
- Messung von Linsen mit einem Durchmesser bis zu 14 mm
- Oberflächenmessung bis  $7^\circ$  Abweichung von der Sphäre (mit optionalem Reflex-Modul)
- Kompakte und robuste Bauweise
- Flexible Wellenfrontmessung im Labor und in der Produktion
- Integration in bestehende Labor- oder Produktionsumgebungen
- Kommunikation über CameraLink oder IEEE 1394b mit der WaveMaster® Software



## WaveMaster®

Mit den Systemen der WaveMaster®-Serie bietet TRIOPTICS Komplettsysteme zur Wellenfrontprüfung, die für typische, aber auch teilweise sehr spezifische Messaufgaben konfiguriert sind. Damit entfällt der Aufbau auf einer klassischen optischen Bank. Alle Komponenten sind von uns aufeinander abgestimmt und justiert. In Kombination mit der Software lassen sich viele Vorgänge automatisieren. So kann die Prüfzeit deutlich verkürzt werden.

Neben Systemen für die Einzelprüfung von Linsen oder Linsensystemen in axialer oder auch außeraxialer Abbildung steht auch ein System für die Chargenprüfung in der Serienproduktion zur Verfügung.

WaveMaster®	Compact 2	PLAN	Field	UST	PRO 2
<b>Einsatzort</b>					
Einzellinsenprüfung	■	■	■	■	
Serienfertigung					■
<b>Messumfang</b>					
Axial	■	■	■	■	■
Außeraxial			■	■	
<b>Prüfling</b>					
Planoptiken	■	■			■
Sphärische & asphärische Optiken	■		■		■
Wafer					■
Beidseitig telezentrische Objektive				■	





# Axiale Wellenfrontanalyse

Zur axialen Messung der Wellenfronten sphärischer, asphärischer und planer Optiken in der Qualitätskontrolle und in Forschung und Entwicklung stehen mit dem WaveMaster® Compact 2 und dem WaveMaster® PLAN zwei präzise Instrumente zur Verfügung. Beide erlauben eine einfache und schnelle Handhabung. Flexibel lassen sie sich auf unterschiedlichste Prüflinge anpassen.

## Hauptmerkmale

- Hohe Messgenauigkeit von bis zu  $\lambda/20$  (RMS) und eine Wiederholbarkeit von  $\lambda/200$  (RMS) mit dem WaveSensor 150
- Hohe Messgeschwindigkeit für hohen Probendurchsatz
- Schnell und einfach auf unterschiedliche Prüflingstypen anpassbar durch austauschbare Vergrößerungsoptik in kinematischer Halterung
- Hochpräziser Prüflingshalter für das Ausrichten im Submikrometerbereich
- Bei Wellenfrontmessungen von Prüflingsserien ist nur ein minimales Nachausrichten der Prüflinge erforderlich
- Echtzeit-Abgleich zwischen Wellenfrontdaten und Musterlinsen oder Designwerten
- Vibrationsunempfindlicher Aufbau
- Umfangreiche Softwarefunktionen für die Messung und Analyse

## WaveMaster® Compact 2 – Sphärische und asphärische Optiken prüfen

Zur Vereinfachung der Handhabung ist beim WaveMaster® Compact 2 sowohl die Positionierung des Wellenfrontsensors und der Abbildungsoptik in die Austrittspupille als auch die Fokussierung der Punktlichtquelle automatisiert. Die Auswahl verschiedener Mikroskopobjektive ermöglicht die Realisierung unterschiedlicher numerischer Aperturen (bis 0,95) und Arbeitsabstände.

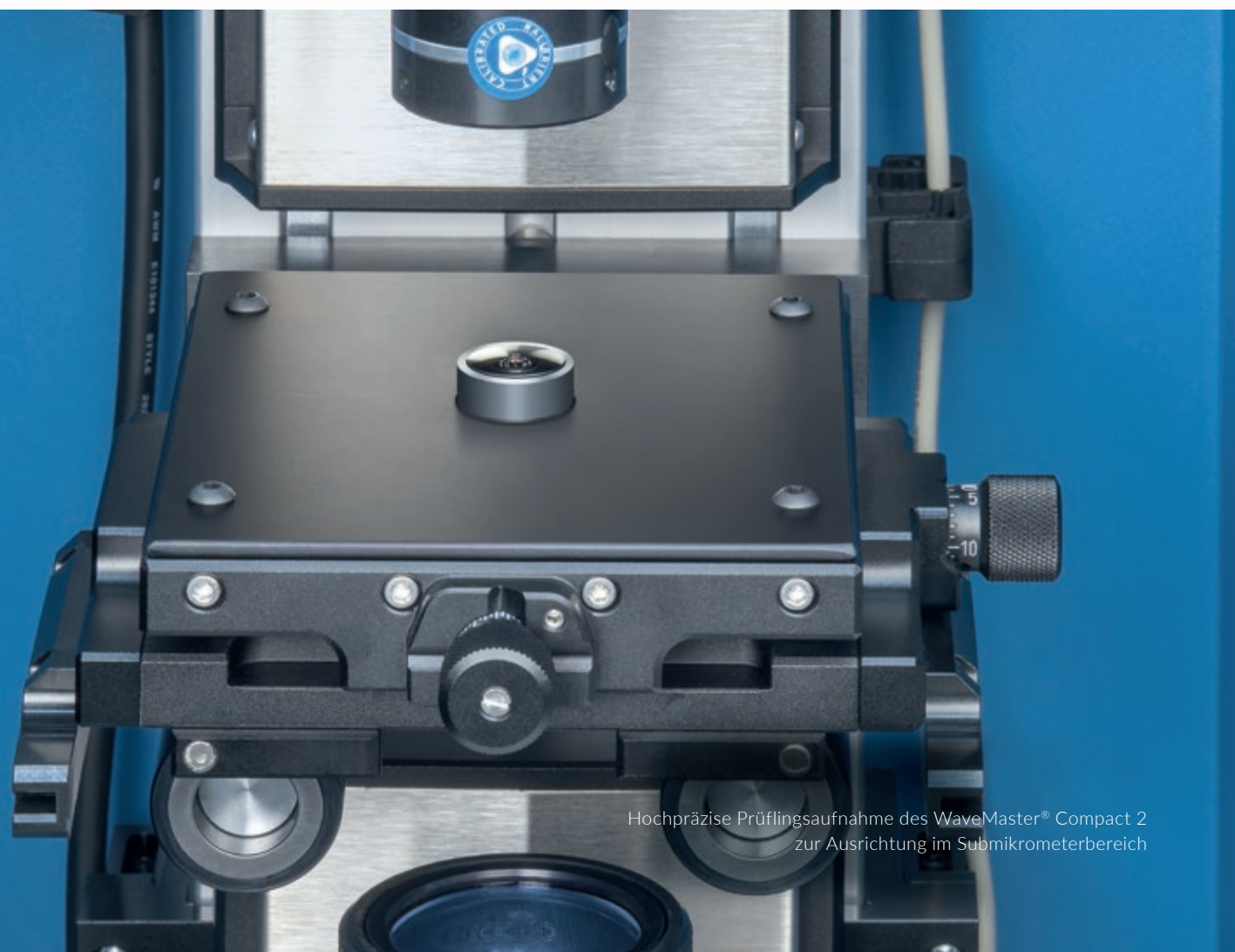
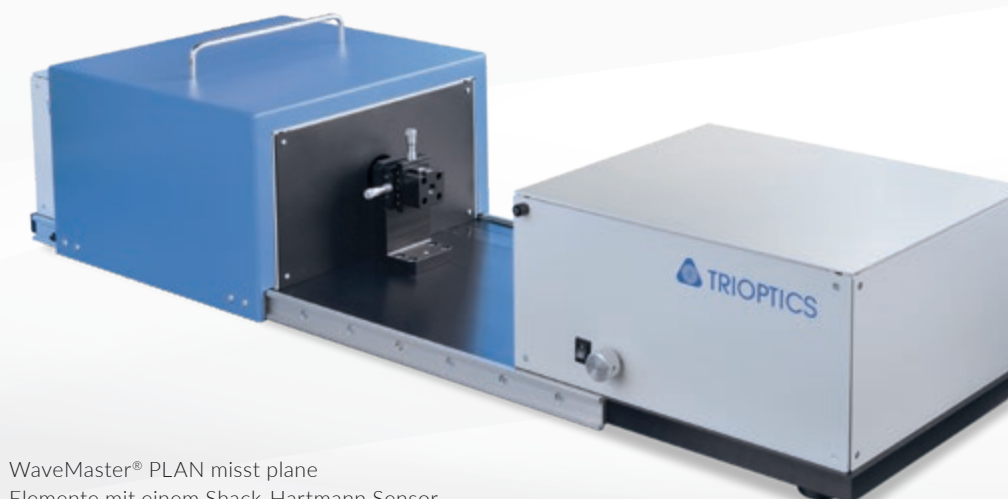
Je nach benötigter Messmethode ist der WaveMaster® Compact 2 in verschiedenen Varianten erhältlich:

WaveMaster® Compact 2	Transmission
WaveMaster® Compact 2 Reflex	Reflexion
WaveMaster® Compact 2 Universal	Transmission und Reflexion



## WaveMaster® PLAN – Plane optische Elemente prüfen

Der WaveMaster® PLAN erlaubt mit seiner kollimierten Beleuchtung auf einfachste Weise die Messung von beispielsweise Planplatten, Filtern oder Keilen in Transmission.



# Außeraxiale Wellenfrontmessung

Gerade bei Weitwinkelobjektiven kommt es auf die hochqualitative Abbildung achsferner Objekte an. Hier ist die reine axiale Wellenfrontprüfung oft nicht mehr ausreichend, da hohe Feldwinkel unbeachtet bleiben. Daher bietet TRIOPTICS auch für diesen Bereich Lösungsmöglichkeiten:

**WaveMaster® Field**  
**WaveMaster® UST**

Universelle Wellenfrontprüfung unter Feldwinkeln von bis zu 70°  
Prüfsystem für beidseitig telezentrische Objektive

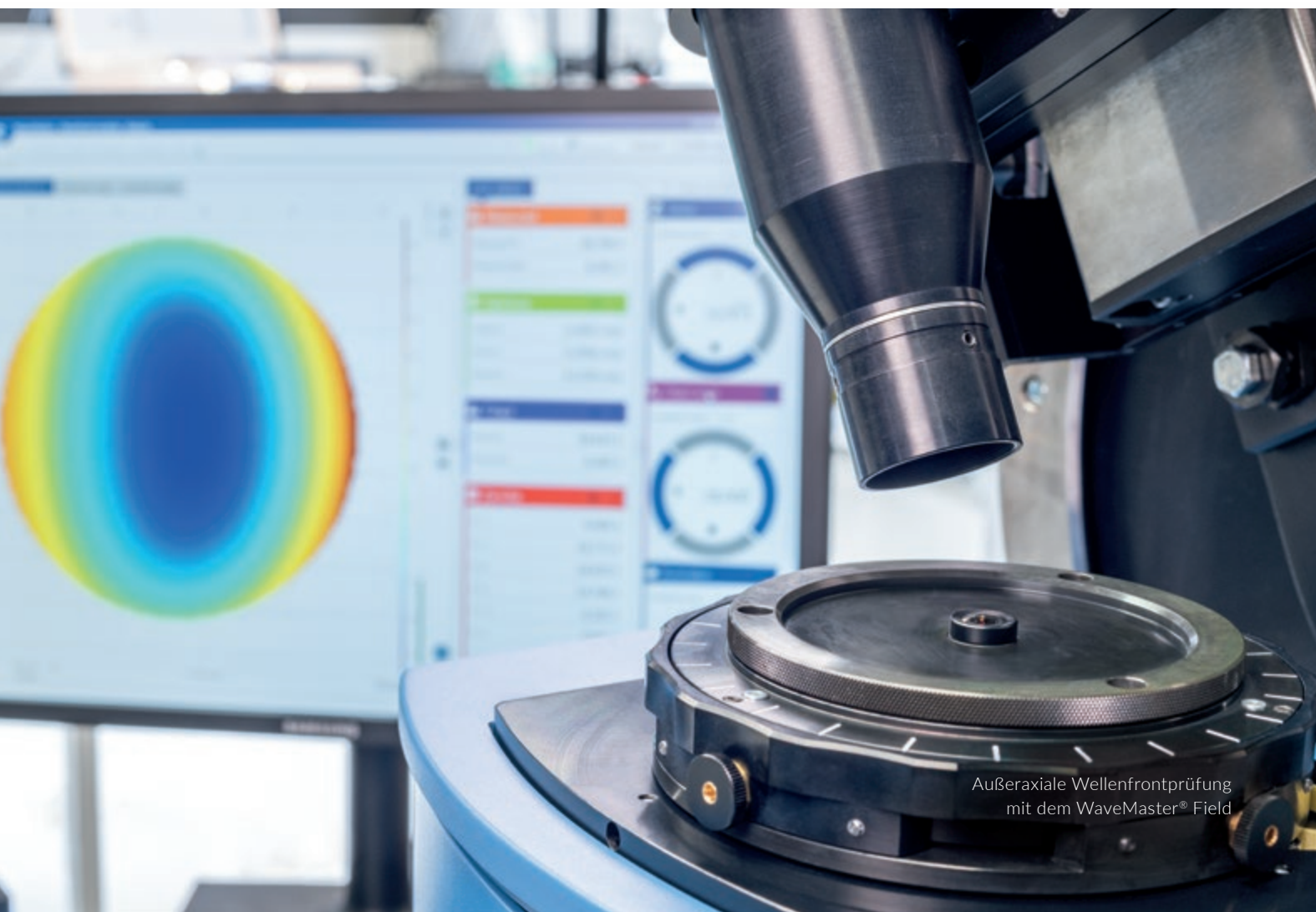
Wie bei den Systemen zur Messung der axialen Wellenfronten wird auch außeraxial mit dem WaveSensor 150 eine hohe Messgenauigkeit von bis zu  $\lambda/20$  (RMS) und eine Wiederholbarkeit von  $\lambda/200$  (RMS) erreicht. Zusätzlich steigert die außeraxiale Messung die Empfindlichkeit in Bezug auf die Linsenzentrierung, so dass eine Optimierung der Linsenpositionierung auf die gewünschte Wellenfront noch präziser erfolgen kann.



## WaveMaster® Field

Der WaveMaster® Field wurde explizit für den Einsatz in Forschung und Entwicklung designt. Das System ermöglicht die umfassende Messung von Prüflingen über deren gesamtes Sichtfeld und die anschließende tiefgreifende Analyse. Individuelle Einfallswinkel und Wellenlängen sind flexibel mit wenigen Handgriffen einzustellen, um wechselnde Beleuchtungsverhältnisse zu simulieren. Anpassungen an unterschiedliche Prüflinge sind ebenso einfach möglich.

WaveMaster® Field für die Prüfung von sphärischen und asphärischen Optiken unter Feldwinkeln von bis zu 70°



Außeraxiale Wellenfrontprüfung mit dem WaveMaster® Field

## WaveMaster® UST

Der WaveMaster® UST ist ein universelles Prüfsystem für beidseitig telezentrische Objektive (Universal Stepper Optic Tester - UST) mit einem Gewicht von bis zu 450 kg. Es misst automatisiert deren gesamtes Feld bis zu einer objektseitigen Feldgröße von 70 x 45 mm<sup>2</sup>. Der Prüfvorgang kann bei mehreren Wellenlängen und unterschiedlichen Intensitäten erfolgen. Vorkonfigurierte Messabläufe und der hohe Automatisierungsgrad sorgen für die richtige Positionierung aller Achsen während der Messung sowie den Wellenlängenwechsel.



WaveMaster® UST zur Prüfung von beidseitig telezentrischen Objektiven



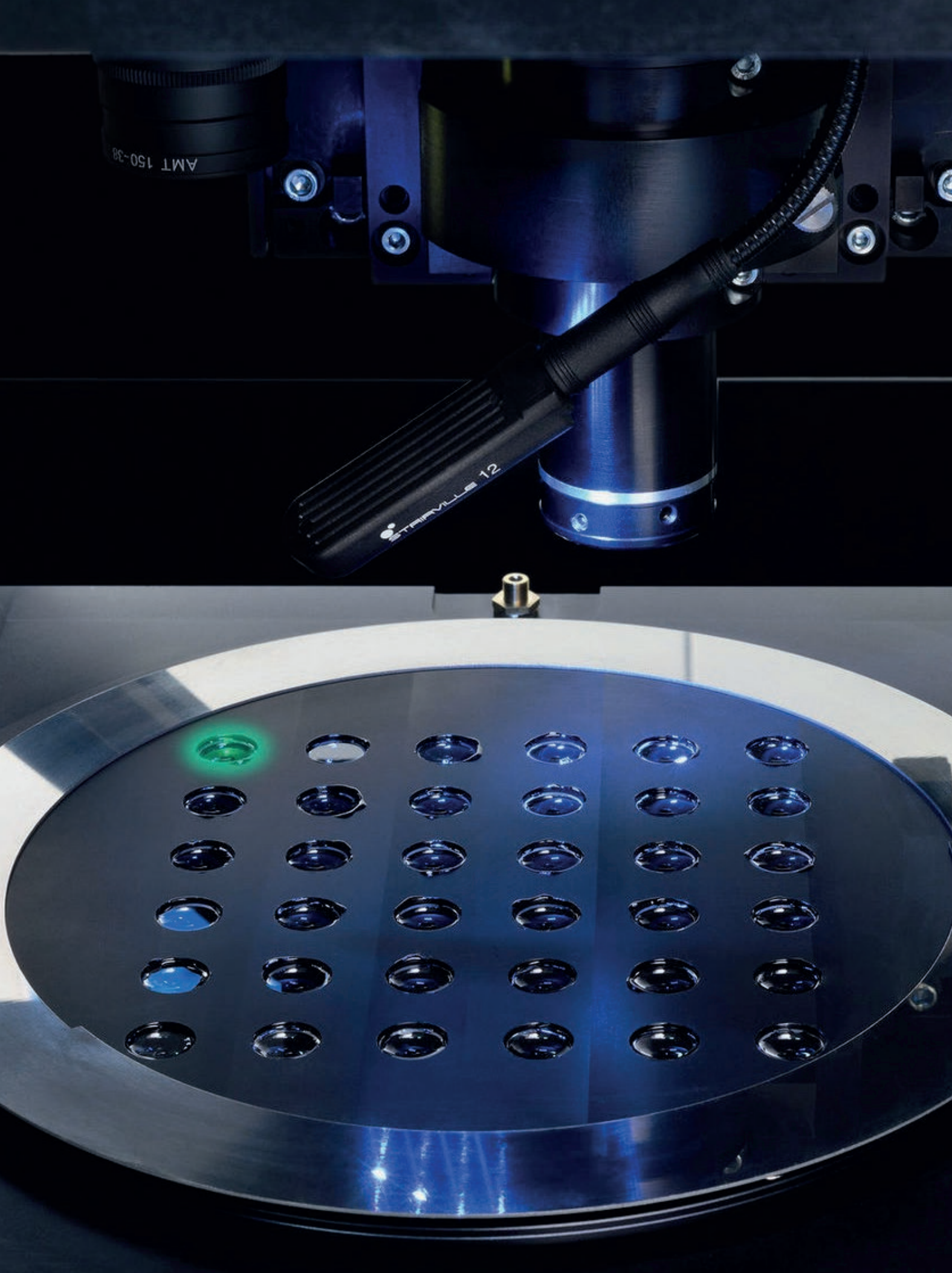
## WaveMaster® PRO 2

### Serienprüfung von Optiken und optischen Wafern

WaveMaster® PRO 2 setzt neue Standards bei der Serienprüfung von Optiken und optischen Wafern, indem komplette Linsenchargen vollautomatisch gemessen werden können. Mit einer typischen Messzeit von drei Sekunden pro Optik und einem schnellen Tray- oder Waferwechsel werden so die Voraussetzungen für den Einsatz in der Massenfertigung geschaffen. Durch den Abgleich der Messergebnisse mit den Designdaten erfolgt die Ausschussanalyse für jede einzelne Linse.

Der WaveMaster® PRO 2 ist in drei Varianten verfügbar. Jede ist auf einen Prüflingstyp spezialisiert:

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>WaveMaster® PRO 2</b>       | Kleine sphärische und asphärische Linsen und Linsensysteme |
| <b>WaveMaster® PRO 2 PLAN</b>  | Plane Linsen und afokale Linsensysteme                     |
| <b>WaveMaster® PRO 2 Wafer</b> | Optische Wafer   |



Prüfung eines optischen Wafers mit Verifizierung der Orientierung

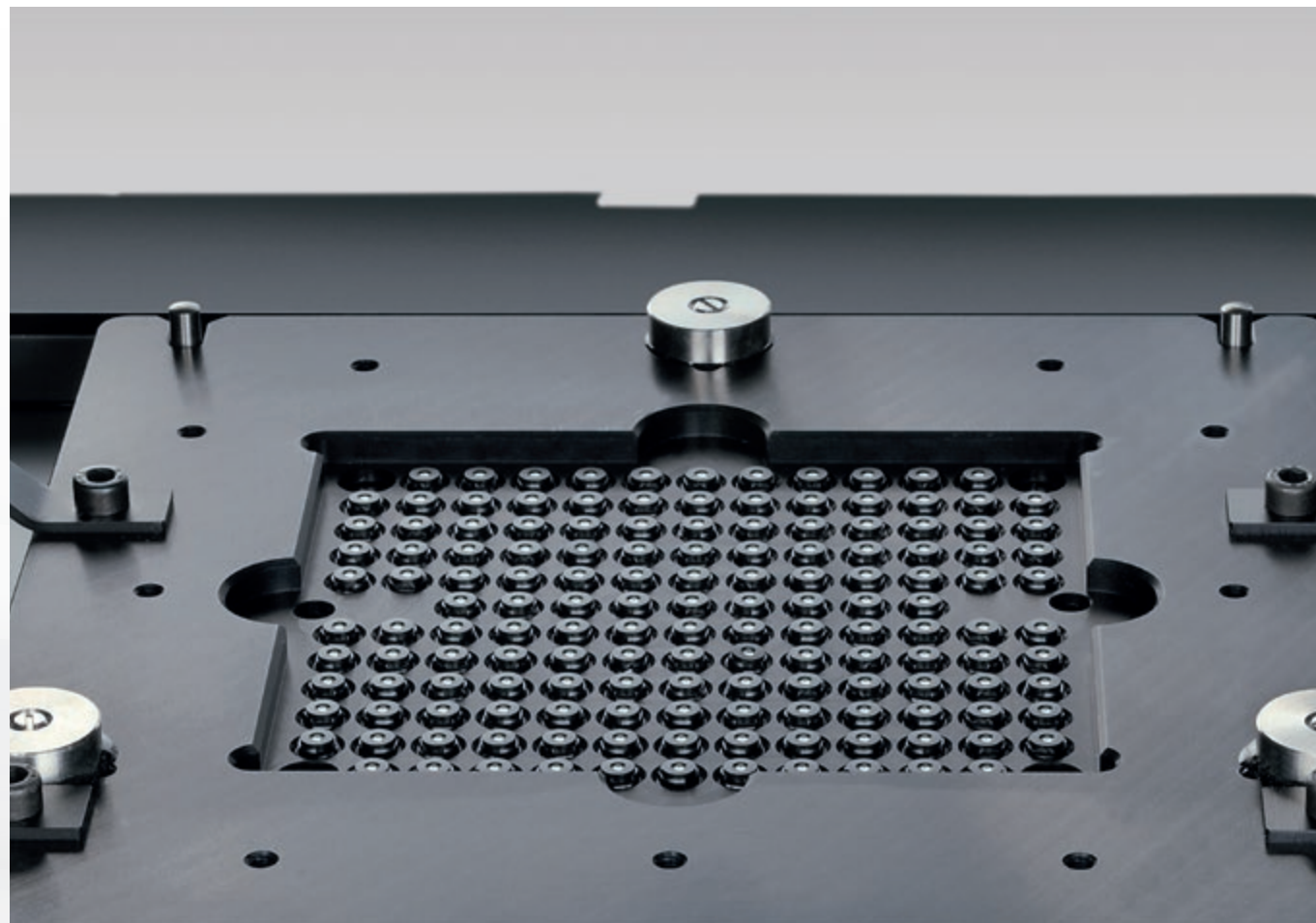


WaveMaster® PRO 2 ermöglicht die Qualitätskontrolle nach der Serienfertigung inkl. Ausschussanalyse



## Vorteile des WaveMaster® PRO 2

- Vollautomatisierte Messung einer grossen Anzahl von Prüflingen (Wafer oder beladene Trays)
- Messzeit: < 3 s (pro Optik und Messschritt)
- Benutzerdefinierte Ausschusskriterien
- Messung der absoluten oder relativen Wellenfront
- Hohe Messgenauigkeit von bis zu  $\lambda/20$  (RMS) und eine Wiederholbarkeit von  $\lambda/200$  (RMS) mit dem WaveSensor 150
- Vollständige Wellenfrontanalyse (PV, RMS, Zernike, PSF, MTF, Strehl)
- Export der Messdaten jeder einzelnen Linse
- Optional: integriertes Messsystem für die Messung der Wafer-Orientierung, Wafer-Durchbiegung und -Verkipfung



Tray für die Aufnahme von Einzellinsen

## WaveMaster® Software

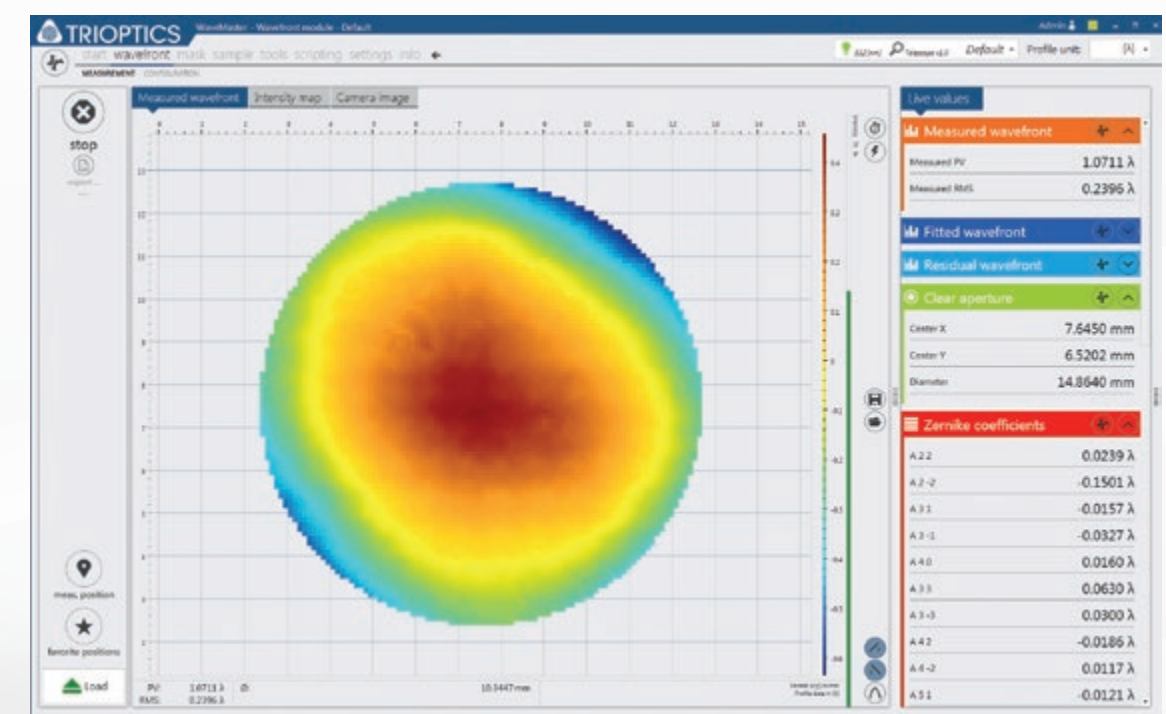
### Übersichtliche Darstellung der Messergebnisse – Umfassende Analyse

Die WaveMaster® Software ist übersichtlich strukturiert, bedienerfreundlich und enthält alle Funktionen, um mit den WaveMaster®-Systemen Prüflinge auszurichten, zu messen und zu analysieren.

Die Software kommuniziert dabei mit dem Shack-Hartmann Sensor und analysiert die gemessene Wellenfront in Echtzeit. Zusätzlich steuert sie die WaveMaster®-Systeme und ermöglicht so eine Automatisierung der Messprozesse.

### Alle Pluspunkte der Software in der Zusammenfassung

- Eine Software für alles: Datenerfassung, Datenberechnung, Kalibrierung und Anzeige der Daten, Echtzeit-Analyse
- Menügesteuerte Bedienung
- Einfache und intuitive Messung und Analyse von Wellenfronten und Oberflächen (mit Reflex-Modul)
- Laden von theoretischen Daten aus ZEMAX und Code V oder der Daten von Referenzlinsen und Vergleich in Echtzeit während der Messungen
- Gerätesteuerung



Darstellung der Messergebnisse einer Einzellinsenprüfung mit Zernike-Analyse durch die WaveMaster® Software



# WaveMaster® Software

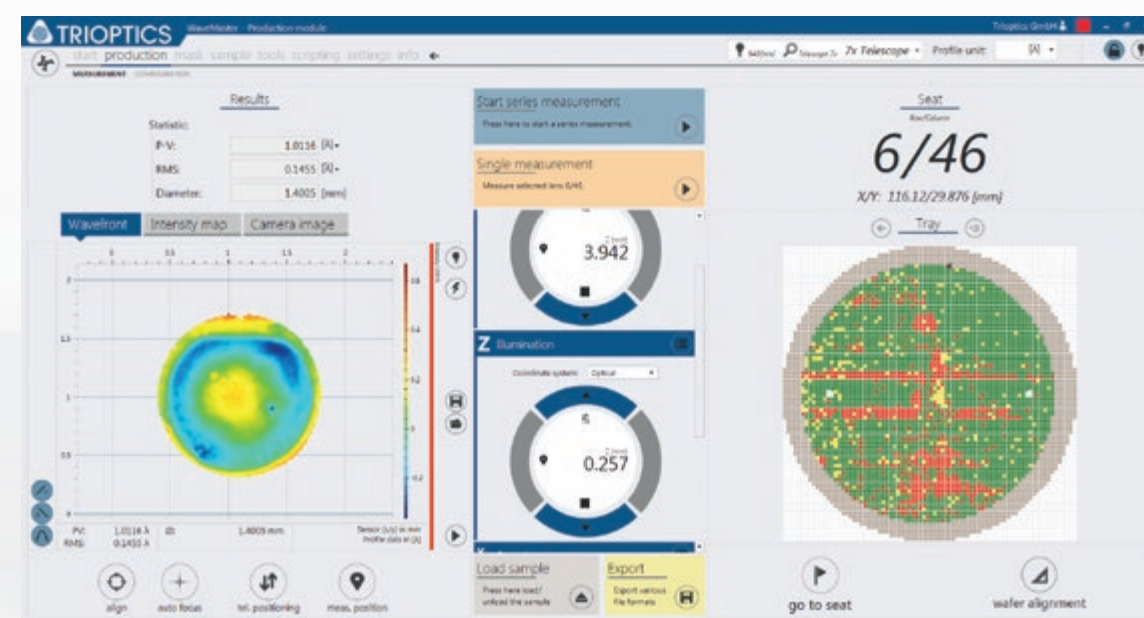
Zur optimalen Messung der Prüflinge werden Mess- und Analysebereiche individuell eingestellt. Die Messergebnisse können auf unterschiedliche Art und Weise dargestellt und die daraus abgeleiteten Größen angezeigt werden:

- 2D- oder 3D-Wellenfront, -Interferenzstreifen und -phase
- PV und RMS
- Intensität
- Lokale Steigungen
- Kamerabild

Je nach Bedarf werden Wellenfront- und Kamerabild einer Mittelung unterzogen. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt über Zertifikate.

## Anpassung an Produktionsverhältnisse

Für die Anwendung in der Produktion wird die WaveMaster® Software bei diesen Systemen um ein entsprechendes Zusatzmodul erweitert. So erlaubt sie die übersichtliche Darstellung des Prüffortschritts für alle Linsen. Dabei wird das Einhalten des Ausschusskriteriums, das aus einer Vielzahl von Parametern frei gewählt werden kann, farbcodiert angezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit der höheren Aberrationen erfolgt eine Korrektur der Wellenfronten für die Zernike-Koeffizienten Verkippung und Defokus. Weiterhin können Nutzerkonten mit verschiedenen Zugriffsrechten versehen werden.

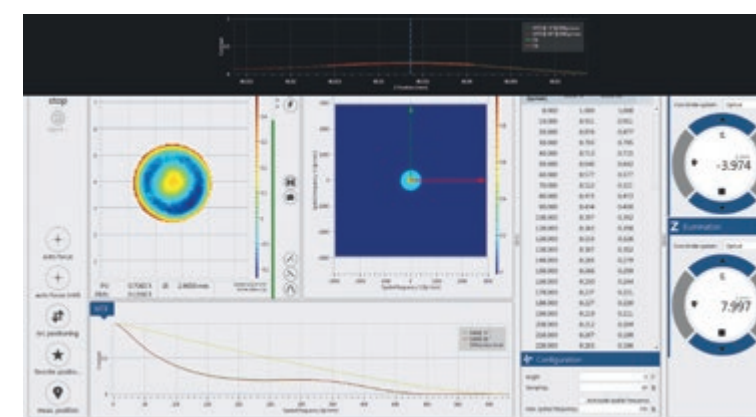


Serienmessung eines Wafers in der Produktion

Die Grundfunktionen der WaveMaster® Software können durch zwei Analyse-Module erweitert werden:

### MTF/PSF-Analyse-Modul

Dieses Modul ermöglicht die Echtzeit-Berechnung und -Anzeige der 3D/2D MTF- und PSF-Daten sowie des Strehlverhältnisses. Die Messergebnisse werden als Tabelle ausgegeben und können exportiert werden.

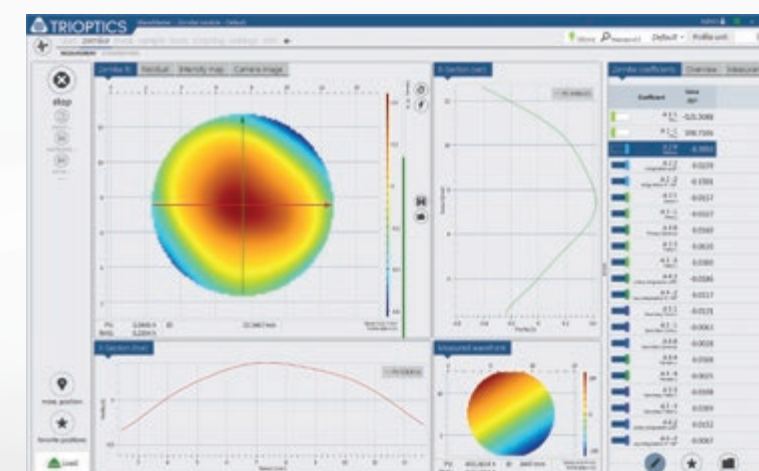


Ermittlung der MTF aus der gemessenen PSF mit dem MTF/PSF-Analyse-Modul

### Zernike-Analyse-Modul

Eine intensive Auswertung der Messergebnisse ist mit dem Zernike-Analyse-Modul möglich. Die Möglichkeiten umfassen:

- Zernike-Fit und Analyse der Wellenfront-Daten in Echtzeit
- Numerische und grafische Anzeige der Fit-Ergebnisse
- Import von Wellenfront-Designdaten aus ZEMAX und CODE V für Echtzeit-Vergleiche
- Export von Wellenfront-Daten und Analyse-Ergebnissen in ASCII- und ZEMAX-Format
- Anzeige des zeitlichen Verlaufs der Zernike-Koeffizienten



Umfassende Auswertung der Aberrationen mit dem Zernike-Analyse-Modul

## Technische Daten

WaveSensor	150	150 mit Reflex-Modul
Allgemein		
Sensorbereich	15 x 15 mm	15 x 15 mm
Wellenlänge	405 nm ... 1100 nm <sup>(1)</sup>	405 nm ... 1100 nm <sup>(1)</sup>
Wellenfront Genauigkeit	< $\lambda/20$ (RMS)	0,05 $\mu\text{m}$ (RMS)
Wellenfront Wiederholgenauigkeit	< $\lambda/200$ (RMS)	0,005 $\mu\text{m}$ (RMS)
Dynamikbereich	2000 $\lambda$	2000 $\lambda$
Messfrequenz	Bis zu 12 Hz	Bis zu 12 Hz
Laterale Auflösung	138 x 138 Mikrolinsen	138 x 138 Mikrolinsen

WaveMaster®	Compact 2	Compact 2 Reflex	Compact 2 Universal
Forschung & Entwicklung			
Prüflingsdurchmesser	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2,3)</sup>	4,5 mm ... 18 mm <sup>(3,5)</sup>	Transmission: 0,5 mm ... 14 mm <sup>(2,3)</sup> Reflexion: 4,5 mm ... 14 mm <sup>(3,5)</sup>
Brennweite (Messkonfiguration)	-30 mm ... +100 mm <sup>(4)</sup>	-	-30 mm ... +100 mm <sup>(4)</sup>
Krümmungsradius	-	-50 mm ... 30 mm <sup>(6)</sup>	-50 mm ... 30 mm <sup>(6)</sup>
Prüflingshalter	Einzelprüfplatz, manuelle Positionierung		
Maximum Asphärität	-	$\leq 7^\circ$ <sup>(7)</sup>	$\leq 7^\circ$ <sup>(7)</sup>

WaveMaster®	PLAN	Field	UST
Forschung & Entwicklung			
Prüflingsdurchmesser	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2,3)</sup>	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2,3)</sup>	bis zu 1100 mm x 650 mm x 1200 mm
Prüflingshalter	Einzelprüfplatz, manuelle Positionierung		Schnittstelle für kundenspezifische Linsenhalter
Maximum Prüflingsgewicht	-	-	450 kg
Maximaler Abstand zwischen Objekt- und Bildebene	-	-	1200 mm
Maximale Feldgröße, bildseitig	-	$\pm 20$ mm	100 mm x 100 mm
Maximale Feldgröße, objektseitig	-	$\pm 70^\circ$	70 mm x 45 mm

WaveMaster®	PRO 2	PRO 2 Wafer	PRO 2 PLAN
Produktion			
Prüflingsdurchmesser	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2)</sup>	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2)</sup>	0,5 mm ... 14 mm <sup>(2)</sup>
Anlagemaß	-12 mm ... +50 mm <sup>(4)</sup>	-12 mm ... +50 mm <sup>(4)</sup>	-
Prüflingshalter	Tray	Wafer-Halter	Tray
Messzeit pro Optik	< 3 s <sup>(8)</sup>	< 3 s <sup>(8)</sup>	< 3 s <sup>(8)</sup>
Prüflingsdurchsatz pro Stunde	$\geq 1200$ Linsen <sup>(8)</sup>	$\geq 1200$ Linsen <sup>(8)</sup>	$\geq 1200$ Linsen <sup>(8)</sup>
Linsen pro Tray	Max. 148 <sup>(8)</sup>	-	Max. 148 <sup>(8)</sup>
Austauschzeit für Tray mit Linsen	10 s	10 s	10 s
Wafer tray Austauschzeit, inkl. Einrichtung	< 2 min	< 2 min	< 2 min
Einrichtzeit für neues Linsendesign	< 5 min	< 5 min	< 5 min

- 1 Nach Kundenwunsch
- 2 Abhängig vom Teleskop
- 3 Weitere auf Anfrage
- 4 Abhängig vom Mikroskop

- 5 Abhängig vom Krümmungsradius und der Beleuchtungsoptik
- 6 Abhängig vom Prüflingsdurchmesser und der Beleuchtungsoptik

- 7 Lokale Abweichungen von der best-passenden Sphäre
- 8 Abhängig vom Prüfling

## Zubehör

Alle WaveMaster®-Systeme zeichnen sich durch einen flexiblen Aufbau aus, so dass sie an die speziellen Anforderungen ihrer Anwendung angepasst werden können.

### Beleuchtung

Es stehen Lichtquellen mit unterschiedlichen Wellenlängen zur Auswahl. Aufgrund der kinematischen Lagerung können die unterschiedlichen Lichtquellen einfach in die Instrumente integriert werden.

### Prüflingshalterungen

Zur optimalen Positionierung von Prüflingen werden Einzellinsenaufnahmen und vor allem Trays individuell auf die Kundenbedürfnisse abgestimmt.

### Teleskope

Um den dynamischen Bereich des Shack-Hartmann Sensors und somit die laterale Auflösung des Sensors maximal ausnutzen zu können, ist ein Satz von Teleskopen erhältlich. In Abhängigkeit des Prüflingsdurchmessers und der Abmessung des Wellenfrontsensors wird die optimale Vergrößerung des Teleskops bestimmt. Mit Hilfe der kinematischen Lagerung können die Teleskope anschließend problemlos ausgewechselt werden.





## TRIOPTICS GmbH

Strandbaddamm 6  
22880 Wedel  
Deutschland

+49 4103 18006-0  
sales@trioptics.com  
www.trioptics.com

