

**Polytec**

Technical series



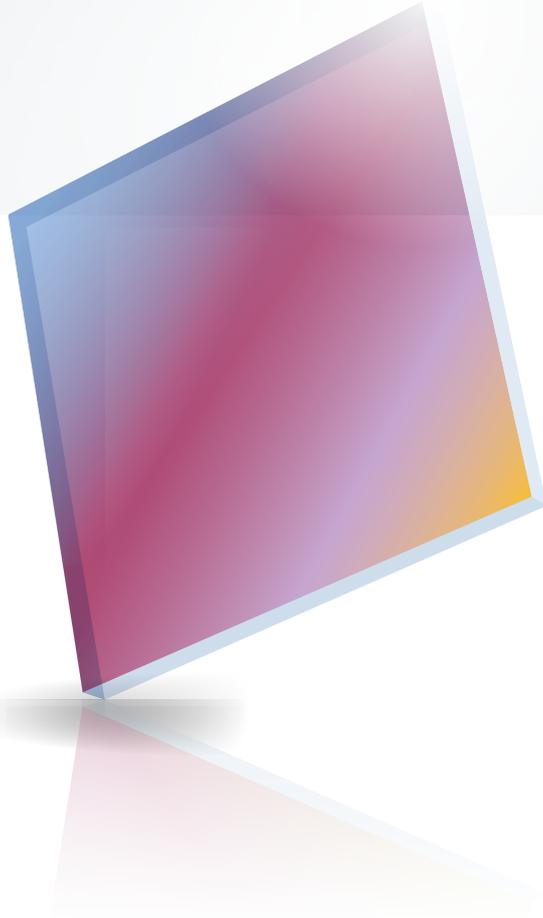
# Aufbau von Spektrometern

Transmission vs. Reflexion

## **Nahinfrarot- Spektroskopie bringt Licht in Ihre Produktionsprozesse.**

Entscheiden Sie sich für das Spektrometer,  
das für die Gegenwart und die Zukunft  
entwickelt wurde





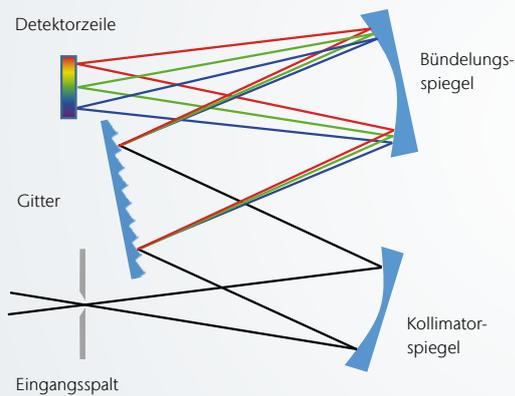
**Aus Sicht der Astronomen werden für die Teleskope des 21. Jahrhunderts Spektrometer der neuesten Generation benötigt, die beste Leistung und ein robustes Design mit der Garantie für einen langjährigen und zuverlässigen Betrieb bieten. Über viele Jahrzehnte hinweg waren traditionelle Spektrometerkonzepte auf Basis von Surface Relief (SR)-Reflexionsgittern das Standardwerkzeug. Dann erkannten die Astronomen die Grenzen konventioneller Reflexionsspektrometer mit zweidimensionalen Oberflächen-Streustrukturen und die überlegene Leistung von Transmissions-Spektrometern auf Basis von dreidimensionalen Volumen-Streustrukturen, den sogenannten Volume Phase Holographic (VPH) Gittern.**

Die Polytec Ingenieure waren sich der Bedeutung dieser Fortschritte in der Spektroskopie bewusst und integrierten VPH-Gitter in ihre Spektrometerkonzepte, um ihren Kunden bestmögliche Leistungen in der Prozessanalytik zu bieten. So können sich die Prozessspezialisten auf ihre VPH-Spektrometer verlassen, denn diese ermöglichen eine akkurate, verlässliche und kosteneffiziente Kontrolle

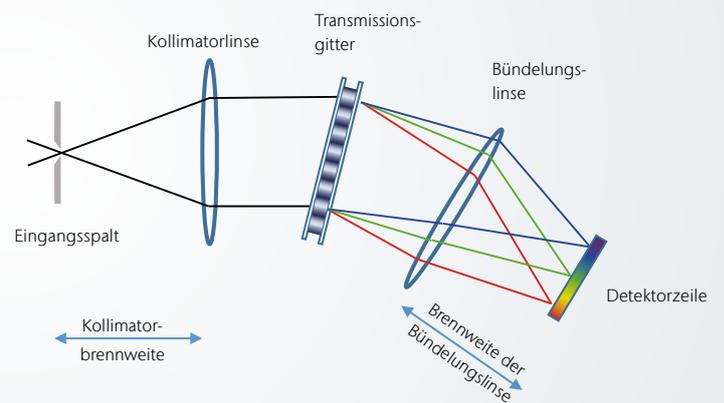
und Überwachung ihrer Prozesse. Die im Feldeinsatz erprobten Spektrometer arbeiten mit überlegener VPH-Technologie.

Diese kurze Einführung in den Aufbau von Spektrometern vergleicht die beiden am häufigsten verwendeten Modelle: Transmissions- und Reflexions-Spektrometer.

## Czerny-Turner-Spektrometer



## Transmissions-Spektrometer



# Einführung in den Aufbau von Spektrometern

Zweck und Aufgabe eines Spektrometers ist die Messung der „Lichtmengen“ bei spezifischen und ausgewählten Wellenlängen. Mit anderen Worten, ein Spektrometer quantifiziert selektiv die einzelnen Farben des Regenbogens. Moderne Spektrometer beinhalten spezifische optische Komponenten wie Eingangs- und Kollimator-Optik, ein dispersives Element, das normalerweise ein Beugungsgitter ist, sowie eine bündelnde Optik. Diese lenkt das Lichtspektrum auf die Detektorzeile, welche die Lichtmenge bei jeder Wellenlänge einfängt. Die spektrale Auflösung (der minimale Wellenlängenabstand, der erforderlich ist, um zwei schmalbandige Spektrallinien voneinander zu unterscheiden) und der Wellenlängenbereich sind zwei kritische Spezifikationen für ein Spektrometer. Weitere wichtige Spezifikationen sind die Empfindlichkeit, die F-Zahl, das Signal-/Rausch-Verhältnis (S/N), die Größe, der Preis, die Geschwindigkeit, Linearität und Robustheit (mechanische und thermische Stabilität).

### Transmission vs. Reflexion

Die beiden am weitesten verbreiteten Modelle sind das Czerny-Turner(CZ)-Spektrometer (in der Regel mit Reflexionsgitter und Spiegeln) und das Transmissionsgitter-Spektrometer.

Bei CZ-Spektrometern ist das Streulicht (aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Gitter), der geringere Lichtdurchsatz durch das System (aufgrund des Reflexionsgitters) und das geringere Reflexionsvermögen der Spiegel (im Vergleich zum Durchgang durch Linsen) zu berücksichtigen. Auf Spiegeln basierende Vorrichtungen wie CZ-Spektrometer leiden typischerweise unter optischen Fehlern wie Defokussierung, chromatischer Aberration,

Koma (Asymmetriefehler), sphärischer Aberration und Astigmatismus. Es ist schwierig, diese Fehler bei allen Wellenlängen auszugleichen. In der Regel sind zusätzliche optische Bauteile nötig, wie etwa asphärische oder holografische Elemente.

Transmissions-Spektrometer mit VPH-Gittern beugen das Licht effizienter als reflektierende Spektrometer vom CZ-Typ. VPH-Gitter haben nicht nur eine höhere Beugungseffizienz; bei ihnen treten auch nicht die Fehler der Reflexions-Spektrometer vom CZ-Typ auf. Ihre Leistung ist über alle Wellenlängen sehr einheitlich.

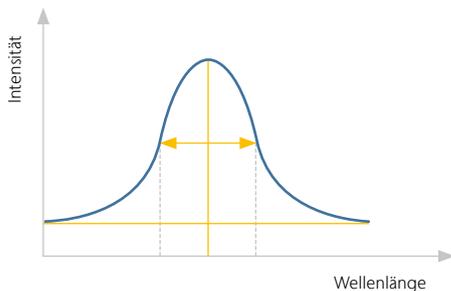
# F-Zahl, numerische Apertur, Étendue und Auflösung

Die F-Zahl beschreibt die Fähigkeit einer optischen Vorrichtung, Licht zu bündeln. Ein weiterer gängiger Begriff ist die numerische Apertur (NA). Sie stellt den möglichen Öffnungswinkel einer optischen Vorrichtung dar. F-Zahl und numerische Apertur verhalten sich umgekehrt proportional zueinander. Wie in der nachfolgenden Gleichung zu sehen ist, wächst die NA mit kleinerer F-Zahl:

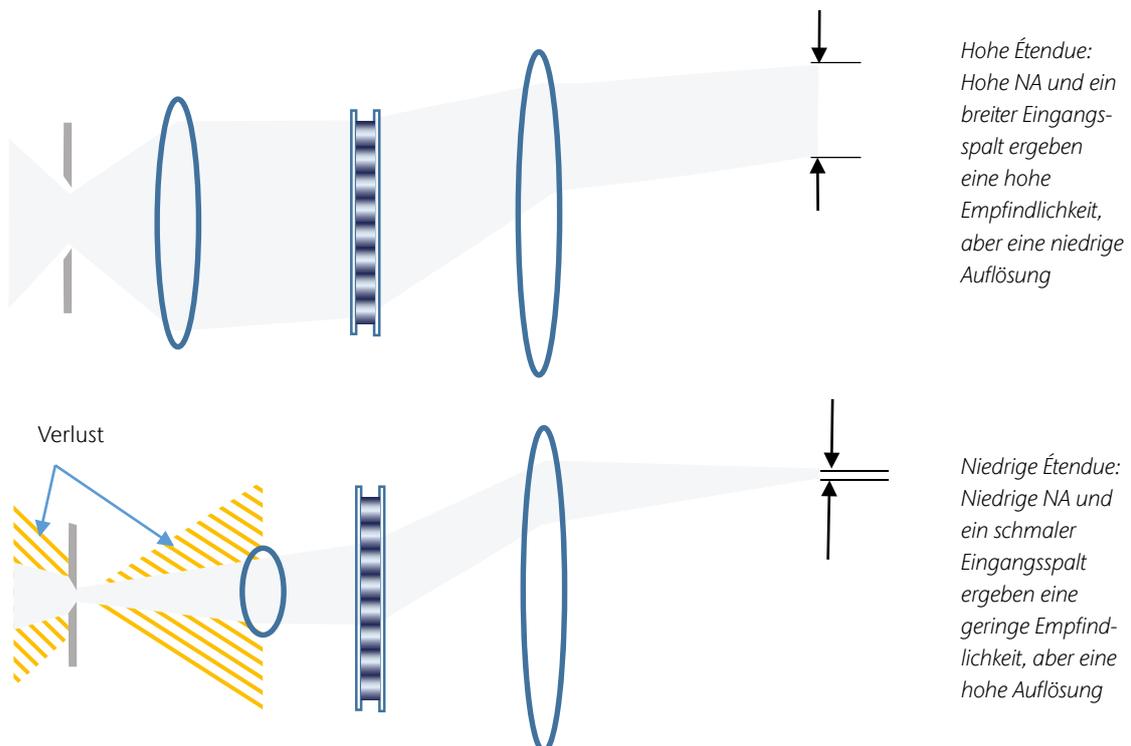
$$f\# = \frac{1}{(2 \text{ NA})}$$

Der Begriff Étendue kombiniert die NA und die (tatsächliche) Fläche des Eingangspalts und bestimmt, wie viel Licht eine optische Vorrichtung in ein Spektrometer einleiten kann. Unglücklicherweise sind Étendue und spektrale Auflösung einander entgegengerichtete Parameter. Daher müssen sie in jeder spezifischen An-

wendung optimiert werden. Häufig erfolgt die Messung der Auflösung eines Spektrometers mit einer monochromen (einfarbigen) Lichtquelle (z. B. mit einem Laser) mit anschließender Skalierung auf die Halbwertsbreite (FWHM, Full Width at Half Maximum) dieses Maximums (peaks). Theoretisch schränkt die Beugungsgrenze die spektrale Auflösung ein, aber in der Praxis bilden die diversen Abbildungsfehler der Optik der meisten kompakten Spektrometer (Linsen bzw. Spiegel und Gitter) die begrenzenden Faktoren. Diese Optimierung wird durch die Verringerung des Öffnungswinkels (NA) und einen winzigen Eingangsspalt erreicht. Bei diesem Verfahren gelangt nur ein kleiner Teil des verfügbaren Lichts tatsächlich zum Detektor. Die Folge ist ein niedriger Photonen-Durchsatz und ein niedriges Signal-/Rausch-Verhältnis (S/N).



Nachfolgend sind einige Beispiele von Kompromissen zwischen Étendue und numerischer Apertur (NA) aufgeführt.



# Vorteile eines Transmissions-Messaufbaus

Der größte Vorteil eines Spektrometers mit Transmissionsgitter gegenüber einem Reflexions-Spektrometer ist der höhere Photonen-Durchsatz. Dabei leistet die höhere Beugungseffizienz von Volume Phase Holographic (VPH) Gittern den signifikantesten Beitrag zu diesem höheren Durchsatz. Hochleistungs-Antireflex(AR)-Beschichtungen erhöhen den Durchsatz zusätzlich und minimieren Fresnel-Verluste. Reflexionsgitter (und die Spiegel von CZ-Spektrometern) weisen aufgrund der Oberflächenverluste bei der Reflexion eine geringere

Leistung auf. Außerdem stehen beim Entwurf eines VPH-Gitters im gewünschten Wellenlängenbereich mehr Parameter zur Optimierung zur Verfügung. Bei VPH-Gittern ist die Beugungseffizienz, aufgetragen gegen die Wellenlänge, sehr gleichförmig. Die in CZ-Spektrometern verwendeten Reflexionsgitter hingegen sind für einen spezifischen Wellenlängenbereich optimiert. Jenseits dieser Wellenlänge sinkt ihre Beugungseffizienz deutlich.

## Prozess-Spektroskopie und die notwendige Stabilität

Ein gängiges Verfahren bei der Verwendung von CZ-Spektrometern ist die Neigung des Gitters an einer festen Achse, um unterschiedliche Spektralbereiche sequentiell zu messen. Ein CZ-Spektrograf lässt sich aber auch mit festem Gitter konzipieren. Jede Neigung oder Drehung des Gitters (z. B. durch Vibrationen, Stöße oder Temperaturänderungen) verändert jedoch den

gemessenen Spektralbereich und auch die Genauigkeit der Wellenlängen. Im Gegensatz hierzu sind die Volume Phase Holographic (VPH) Transmissionsgitter unempfindlich gegen Drehungen, denn diese wirken sich nicht auf die Ablenkungswinkel aus. Daher sind auf Transmissions basierende Spektrometer stabiler und robuster.

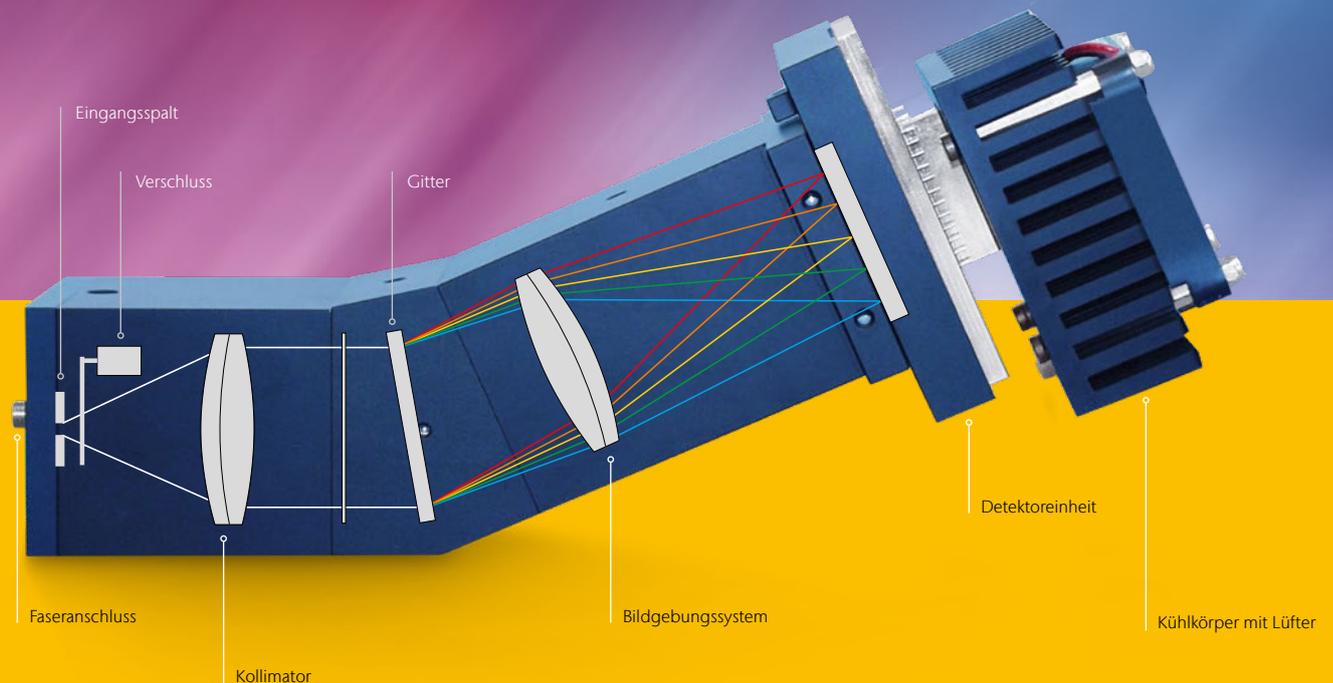
# Zusammenfassung: Aufbau von Spektrometern



## Transmissions-Spektrometer bieten Vorteile in komplexen Messanwendungen wie zum Beispiel:

- Niedrige Streulichtstärke (hoher Photonen-Durchsatz durch das Transmissions-Spektrometer)
- Schnelle spektrale Datenerfassung führt zu hoher zeitlicher Auflösung
- Hohe Prozessstabilität bei Temperaturschwankungen und Schwingungen

Ein komponentenbasierter Spektrometeraufbau ermöglicht den Zugang zu allen Spektrometerkomponenten (insbesondere zum Detektor), was die Integration und Wartung von Transmissions-Spektrometern in einer Prozessumgebung vereinfacht. Dank der Berücksichtigung von Design- und Wartungsaspekten profitieren Integratoren von diesem einfachen Zugang im Rahmen ihrer spezifischen Anwendungen.



# Höchstleistung

## NIR-Spektrometer Polytec PAS

Polytec Advanced Spektrometer (PAS) sind speziell für industrielle Echtzeitanwendungen konzipiert. Basierend auf rauscharmer Diodenarray-Technologie, Präzisionsoptik und überlegenem Transmissionsgitter-Design sind PAS-Spektrometer das ideale Werkzeug für eine schnelle und zuverlässige Datenerfassung. Über Lichtwellenleiter verbundene Komponenten ermöglichen eine flexible Integration in unterschiedliche Messanordnungen.

PAS-Spektrometer sind die optimale Lösung für die NIR-Prozessanalytik.



## Zukunft seit 1967

Hightech für Forschung und Industrie.  
Vorreiter. Innovatoren. Perfektionisten.

Den Ansprechpartner für Ihre  
Region finden Sie unter:  
[www.polytec.com/contact](http://www.polytec.com/contact)

**Polytec GmbH**  
Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn  
Tel. +49 7243 604-0 · [info@polytec.de](mailto:info@polytec.de)