

Optische Gitter: Die Abbildung der Realität

75 Jahre berührungslose dynamische Meßtechnik auf der Basis optischer Gitter

•  Noch vor dem Beginn der modernen Optik, sogar vor Erfindung der Halbleiterelektronik erblickte ein optoelektronisches Sensorprinzip das Licht der Welt, das die Detektion von Bewegungen durch die Abbildung auf ein Gitter ermöglichte. Aber erst in den 1960er Jahren führte ein tieferes Verständnis der Signaltheorie hinter dem optischen Aufbau zu einer weitverbreiteten dieser Technologie für die berührungslose, schlupffreie Messung dynamischer Vorgänge. Der vorliegende Artikel beschreibt Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft eines Meßprinzips, auf das sich zwei Schwesterfirmen in der Tradition der ehemaligen Ernst Leitz Wetzlar GmbH spezialisiert haben.

Die Übertragung von Antriebskräften durch Reibungskräfte, beispielsweise im Rad-Schiene-Kontakt von Schienenfahrzeugen, ist stets mit einem gewissen Schlupf verbunden. Wird dann zum Zweck der Fahrdynamikregelung die Fahrzeuggeschwindigkeit über Drehgeber an den Achsen erfaßt, führt das zu nicht vernachlässigbaren systematischen Meßfehlern, insbesondere dann, wenn es sich um angetriebene Achsen handelt.

Die beiden Schwesterfirmen CORRSYS 3D Sensors AG und CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH, Wetzlar, entwickeln und vermarkten Sensorsysteme für die berührungslose Messung der Dynamik von Schienenfahrzeugen und industriellen Produktionsprozessen bzw. von Kraftfahrzeugen. Herzstück dieser Systeme ist ein gitteroptischer Sensor für Geschwindigkeit und Weglänge relativ zu der Oberfläche, gegenüber der sich der Sensor bewegt. Die einzige Voraussetzung, ist eine stochastische Oberflächenstruktur mit ausreichender Textur für ein kontrastreiches Bild auf dem Gitter. Sehr bald nach Gründung des ersten CORRSYS-Unternehmens im Jahre 1993

DIE AUTOREN

JÖRG HAUS

Jörg Haus, Jahrgang 1966, legte seine Diplomprüfung am Fachbereich Physik der Justus-Liebig-Universität Gießen ab, wo er später auch promovierte. Seine ersten Industrieerfahrungen sammelte er in der Entwicklungsabteilung der Leitz Brown & Sharpe Meßtechnik GmbH, Wetzlar, und im Bereich Qualitätssicherung der Braun AG, Kronberg im Taunus.

1999 trat er in die Entwicklungsabteilung der CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH ein und wechselte später in die entsprechende Abteilung der CORRSYS 3D Sensors AG. Dort zeichnete er verantwortlich für eine Reihe von Forschungs- und Produktentwicklungsprojekten auf dem Gebiet der optischen Sensorik. Seit Januar 2007 arbeitet Herr Haus für die Helmut Hund GmbH in Wetzlar



••
Jörg Haus
Helmut Hund GmbH
Wilhelm-Will-Str. 7
35580 Wetzlar
Tel.: 0 64 41 - 20 04 44
Fax: 0 64 41 - 20 04 44
E-Mail: j.haus@hund.de
Website: www.hund.de

NORBERT LAUNGER

Norbert Lauinger, geboren 1935, hat seine Diplomprüfung in Industriepsychologie an der Universität Freiburg absolviert. Nach einer Ausbildung in Mikroskopie und optischer Meßtechnik bei der Ernst Leitz Wetzlar GmbH hatte er die Leitung von E. Leitz Frankreich/Paris für 10 Jahre inne. Im Anschluß folgten 15 Jahre als freiberuflicher Unternehmensberater in Deutschland und Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der visuellen Wahrnehmung, die in 40 Veröffentlichungen und zahlreichen Patenten mündeten. Von 1993 bis 2005 war er Geschäftsführer der CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH, über fünf Jahre im Vorstand von Optence e.V. Hessen-Rheinland-Pfalz und Initiator der Photonik Zentrum Hessen in Wetzlar AG. Derzeit ist er Vorstandsvorsitzender der CORRSYS 3D Sensors AG Wetzlar und der Photonik Zentrum Hessen in Wetzlar AG.



••
CORRSYS 3D Sensors AG
Charlotte-Bamberg-Str. 6
35578 Wetzlar
Tel.: 0 64 41 - 209 14 0
Fax: 0 64 41 - 209 14 14
E-Mail: norbert.lauinger@corrsys-datron.com
Website: www.corrsys3d.com

wurde das Meßprinzip auf dynamische Messung in zwei Dimensionen erweitert. Nach 13 Jahren intensiver Entwicklung sind mittlerweile Sensoren zur präzisen Erfassung von Dynamiken in ein, zwei und drei Dimensionen verfügbar.

Die Vergangenheit

Bereits 1935 wurde Alan S. Fitz Gerald ein Bewegungsmelder patentiert, der auf der Abbildung einer Szene auf ein Gitter basiert

[1]. Jede Bewegung innerhalb der Szene erzeugt einen alternierenden Photostrom in einer Photozelle hinter dem Gitter (Abb. 1). Durch Bildverdopplung erlauben zwei komplementäre Gitter die Eliminierung statischer Signalkomponenten durch einen Differenzverstärker, während sich die Wechselanteile addieren. Da der Patentantrag bereits 1932 gestellt worden war, blicken wir 2007 auf mittlerweile 75 Jahre erfolgreicher Umsetzung dieses Meßprinzips zurück. Fitz Gerald beschreibt darüber hinaus in seinem

Patent eine Anwendung, in der seine Erfindung zur Detektion von Flecken oder Materialfehlern auf bewegten Bandmaterialien verwendet werden könnte, jedoch denkt er noch nicht darüber nach, die vorhandene Oberflächenstruktur des Materials für eine kontinuierliche Messung dynamischer Größen heranzuziehen.

Ein ähnlicher Aufbau, bei dem ein gitteroptischer Sensor mit einer Luftbildkamera gekoppelt ist, wird im U. S. Patent 2,413,349 beschrieben [2]. Durch die Erfassung der Flugzeugbewegung über Grund kann eine Synchronisation mit der Filmbewegung erfolgen, so daß ein unverzerrtes Bild des überflogenen Geländes entsteht. U. S. Patent 2,942,119 wurde schließlich für ein Meßprinzip erteilt, mit dem die Geschwindigkeit eines Flugzeugs über Grund quantitativ gemessen werden kann [3]: Von insgesamt drei optischen Gittern mißt eines die Geschwindigkeitskomponente entlang der Flugzeug-Längsachse, die anderen beiden, symmetrisch zu beiden Seiten des ersten Gitters angeordnet, sind zur Einstellung identischer Frequenzen drehbar gelagert. Damit ist die Differenz der Frequenzen aus dem erstem und den beiden anderen Gittern ein Maß für den Driftwinkel des Flugzeugs. Es dauerte danach noch bis 1966, daß J. T. Ator [4] den Mechanismus der Signalerzeugung als kontinuierliche optische Korrelati-

onsrechnung („continuous optical correlation processing“) mit dem Gitter als Raumfilter beschreibt. In der Folge erschienen Arbeiten mit detaillierteren Beschreibungen, etwa von Delingat (1976, [5]) sowie von Aizu und Asakura (1987, [6]). Diese Autoren beschreiben das Sensorsignal als die Faltung der zweidimensionalen Intensitätsverteilung des Oberflächenbildes, $i(x, y)$, mit der Öffnungsfunktion, $a(x, y)$, eines Amplitudengitters mit Fläche A . Bezeichnet x die Richtung der Bewegung mit Geschwindigkeit v , kann das Detektorsignal, s , geschrieben werden als:

$$(1) \quad s(t) = \iint_A a(x, y) \cdot i(x - vt) \, dx \, dy$$

Nach dem Faltungssatz entsteht das Leistungsspektrum des Signals aus dem Produkt des Leistungsspektrums der Öffnungsfunktion und dem Leistungsspektrum der Intensitätsverteilung im Bild. Da dieses aus der Transformation des Höhenprofils einer texturierten Oberfläche in Helligkeitswerte entsteht, ist es gleichzeitig auch ein Maß für das Ortsfrequenzspektrum der Oberfläche. Das Leistungsspektrum der Gitterfunktion kann daher als Übertragungsfunktion des Sensors verstanden werden: Sie wandelt das Ortsfrequenzspektrum der mit Geschwindigkeit v bewegten Oberfläche in ein periodisches Signal mit Grundfrequenz f_0 , die sich berechnet aus (g : Gitterkonstante, M : Abbildungsmaßstab des Objektivs):

$$(2) \quad f_0 = \frac{M \cdot v}{g}$$

Wird aus dem periodischen Signal ein Pulszug geformt, kann jeder Puls als Längeninkrement $\Delta l = g / M$ aufgefaßt werden. Daher kann die gemessene Weglänge l aus der Pulszahl N berechnet werden zu:

$$(3) \quad l = N \cdot \Delta l = N \cdot \frac{g}{M}$$

Ein typischer Wert für die Gitterkonstante ist $g = 500 \mu\text{m}$. Mit dem Abbildungsmaßstab $M = 0.5$ erzeugt eine Geschwindigkeit $v = 100 \text{ m/s}$ eine Signalfrequenz $f_0 = 100 \text{ kHz}$. Ob-

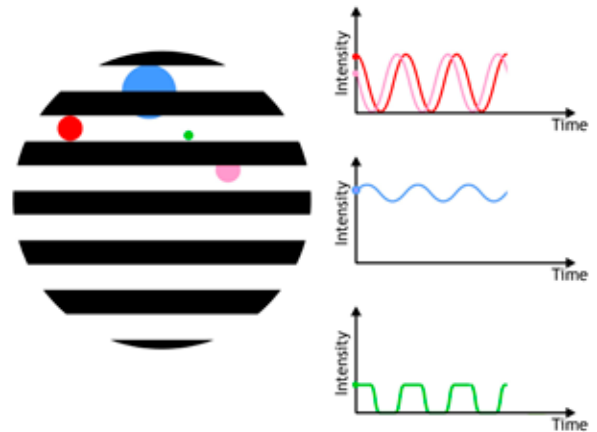


ABBILDUNG 1: Veranschaulichung des Funktionsprinzips des Bewegungsdetektors aus [1]: Jeder Bildpunkt erzeugt ein Wechselsignal auf dem Detektor, die Signalform hängt dabei von der Punktgröße ab. Detektorsignal: Summe über die Signale aller Bildpunkte.

wohl Gl. (1) keine besonderen Bedingungen an die angemessene Oberfläche stellt, ist es offensichtlich, daß das Sensorprinzip vorzugsweise auf stochastisch strukturierten Oberflächen Anwendung findet, wie etwa Asphalt, Beton, auf dem teilweise blanken Stahl eines Schienenkopfes, und auch auf der strukturierten Oberfläche von endlos produzierten Bandmaterialien wie Papier, Teppichboden, Stahl usw. Ist die Oberfläche dagegen periodisch strukturiert, entstehen Schwebungsfrequenzen, die eine eindeutige Signalanalyse extrem erschweren. In den 1970er Jahren wurde schließlich eine große Zahl von Patenten erteilt, die beinahe alle Aspekte der optischen Velozimetrie abdeckten. Das im Jahre 1973 der Ernst Leitz Wetzlar GmbH erteilte Patent DE 2 144 487 [7] war schließlich der Startschuß für die kommerzielle Erfolgsgeschichte hinter dem Markennamen „CORREVIT®“, der sich mittlerweile im Besitz der beiden CORRSYS-Unternehmen befindet. Das Patent beschreibt das Design eines berührungslos-optischen Sensors zur Messung dynamischer Kenngrößen wie Geschwindigkeit und Weglänge in einer Bewegungsrichtung. Eine Erweiterung des Meßprinzips, das eine Messung in zwei Dimensionen erlaubt, und das ein optisches Design verwendet, das noch heute in Gebrauch ist, ist in einem späteren Patent beschrieben [8]. Kurz danach kam noch eine weitere Methode hinzu, mit der es möglich wurde, aus dem optischen Gitter Informationen über den Abstand zur Oberfläche zu gewinnen [9]. Heute ist die optische Gittertechnologie in der Lage, eine Bewegung entlang der drei Koordinatenachsen hochpräzise zu erfassen.

DIE FIRMA

Die CORRSYS-Unternehmen Wetzlar

Die CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH mit Standort Wetzlar wurde 1993 gegründet und ist weltweit führender Hersteller von Sensoren für die berührungslose, schlupffreie Messung dynamischer Größen im Fahrzeugtest. Zu den Kunden zählen nicht nur die Testabteilungen namhafter Automobilhersteller, sondern auch Teams aller Motorsport-Klassen. Ihre Schwesterfirma, die CORRSYS 3D Sensors AG, wurde 2004 am gleichen Standort gegründet. Sie verwendet dieselbe Sensortechnologie, konzentriert sich jedoch auf Kunden in der Schienenfahrzeug- und bandgutfertigenden Industrie. Die Kernkompetenz liegt in der Entwicklung und der Vermarktung optischer Meßtechnik, die unter dem Markennamen CORREVIT® den Ruf als kompetente und verlässliche Partner für die hochpräzise Messung dynamischer Größen garantiert.

Die Gegenwart

Obwohl ein CORREVIT®-Sensor direkt nach der Vorlage der Abb. 1 aufgebaut werden könnte, muß noch eine Reihe praktischer Probleme gelöst werden: Zunächst folgt aus Gl. (1), daß eine Änderung des Abstandes zwischen Sensor und Oberfläche mit einer konventionellen Optik zu einer Änderung des Abbildungsmaßstabes und damit zu einer ungewollten Änderung des Geschwindigkeitsmeßwertes führt. Das Objektiv muß daher beidseitig telezentrisch sein. Da die dann notwendige telezentrische Blende zu einer Verminderung der nutzbaren Lichtintensität führt, benötigt der Sensor eine aktive Beleuchtung. Sie beleuchtet die Oberfläche mit einer Art Dunkelfeldbeleuchtung, so daß ein Bild mit ausreichendem Kontrast entsteht. Als Beleuchtung wird entweder eine Halogenlampe oder ein Hochleistungs-LED-Array verwendet.

Wenn wir darüber hinaus für einen Moment zu der einfachen Beschreibung der Abb. 1 zurückkehren, kann das Detektorsignal als Summe der Signale aller einzelner Strukturpunkte aufgefaßt werden, die über das Bildfeld laufen. Insbesondere solche Punkte, die größer als die Gitterkonstante sind, werden zu einem signifikanten Gleichanteil führen. Da es zusätzlich zwischen den Strukturpunkten Phaseneffekte geben wird,

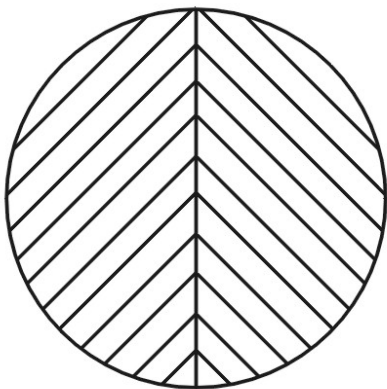


ABBILDUNG 3:
Geteiltes Gitter für die Längs- und Quergeschwindigkeitsmessung.

kommt es insgesamt zu einem beträchtlichen Gleichanteil im Signal, der die Dynamik des Vorverstärkers erheblich begrenzen würde. Daher wird als Gitter kein einfaches Amplitudengitter verwendet, sondern ein Prismengitter (Abb. 2, [8]). Dieses optische Bauelement kann als periodischer Strahlteiler für zwei Photodetektoren aufgefaßt werden.

Durch diese Anordnung „sehen“ die Photodetektoren zwei komplementäre Gitter, durch die zwei gegenphasige Signale entstehen. Ein Differenzverstärker entfernt deren Gleich- und Niederfrequenzkomponenten und übergibt lediglich den Wechselanteil an ein Bandpaßfilter mit nachgeschaltetem Pulszähler.

Insbesondere im Automobiltest muß neben der Längs- auch die Quergeschwindigkeit erfaßt werden, etwa zum Test von elektronischen Stabilitätsprogrammen (ESP). Obwohl das direkt durch den Einsatz zweier Sensoren nach Abb. 2 möglich wäre, die im rechten Winkel zueinander montiert werden müßten, wurde ein einzelnes Gitter entwickelt, das die simultane Messung beider Komponenten in einem Strahlengang erlaubt. Abbildung 3 zeigt dieses geteilte „Tannenbaum“-Gitter, das zwei Geschwindigkeitskomponenten unter ± 45 Grad zur Fahrzeuglängsachse mißt. Längs- und Quergeschwindigkeiten ergeben sich dann aus einfachen trigonometrischen Beziehungen. Ein zusätzlicher Gierratensensor erlaubt damit z. B. die Echtzeitmessung des Schwimmwinkels während eines Fahrmanövers [10]. Ohne beidseitige Telezentrie wäre ein gitteroptischer Sensor für die oben beschriebenen Anwendungen unbrauchbar: Der Abbildungsmaßstab des Objektivs wäre bei einer Änderung des Abstandes zwischen Sensor und Oberfläche, etwa bei Vertikalbewegungen des gemessenen Bandmaterials

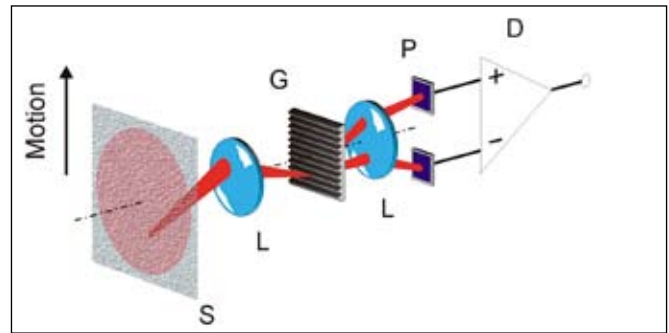


ABBILDUNG 2: Schematischer Aufbau eines CORREVIT®-Sensors. S: beleuchtete Oberfläche, L: Linse, G: Prismengitter, P: Photodioden, D: Differenzverstärker. Objektiv (links) stark vereinfacht

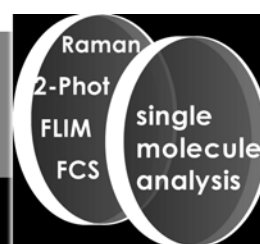
oder beim Einfedern der Karosserie eines Fahrzeugs, in ständiger Veränderung, was bei konstanter Geschwindigkeit zu systematischen Meßfehlern führen würde. Ebenso würde die Bildebene im Allgemeinen nicht in der Ebene des Gitters liegen, das Bild wäre unscharf. Wird jedoch die Eintrittspupille eines solchen Systems geteilt, führt eine Änderung des Abstands zur Oberfläche zu einer Phasenverschiebung zwischen den CORREVIT®-Signalen der beiden Strahlengänge. Befindet sich die Oberfläche in der vorderen Brennebene der Optik, beträgt die Phasenverschiebung Null, in jedem anderen Fall sind Betrag und Vorzeichen dieser Phasenverschiebung direkt mit dem Bodenabstand des Sensors korreliert (Abb. 4). Drei dieser Sensoren ermöglichen darüber hinaus im Automobiltest die Echtzeiterfassung von Nick- und Wankwinkeln aus dem fahrenden Fahrzeug heraus und, im Gegensatz zu anderen Systemen, relativ zur Straßenoberfläche [11].

Die Zukunft

Wie bereits erwähnt, geht der eben beschriebene Höhengsensor auf ein Patent der Ernst Leitz Wetzlar GmbH aus dem Jahr 1975 zurück [9]. Dieses Patent beschreibt ursprünglich kein System, das relativ zu einer bewegten Oberfläche mißt, sondern eines, bei dem die nötige Relativbewegung durch ein schwingendes Gitter erzeugt wird. Ursprünglich war dieses System für

laser specific optical filters
max S/N for ultimate spectroscopy

analysentechnik



www.ahf.de

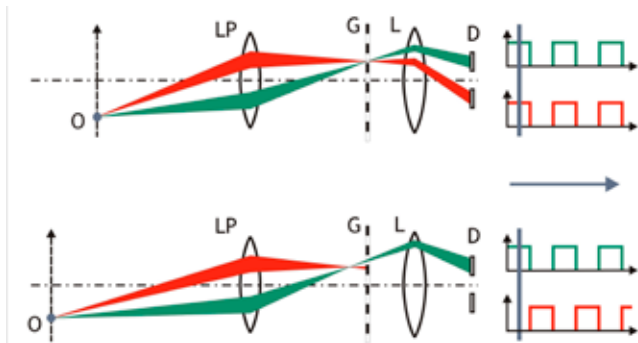


ABBILDUNG 4: Gitteroptischer Höhensensor (schematisch).
O: Texturpunkt, **LP:** Objektiv mit Pupillenteilung, **G:** Gitter, **L:** Feldlinse, **D:** Photodetektoren.

einen passiven Autofokus für Photokameras gedacht, und kam auch damals unter dem Namen „CORREFOT“ zu einer gewissen Popularität, ohne jedoch seinen Weg in die Produktion der berühmten Leica-Kamera zu finden [12]. Weiterentwicklungen durch die CORRSYS-Unternehmen führten schließlich zum „MultiDist 3D“-Konzept: ein Sensorarray aus miniaturisierten Abstandssensoren zur Aufnahme von Tiefenkarten (Abb. 5). Zu den vorläufigen Spezifikationen für einen Sensorprototypen gehört eine laterale Auflösung von 7 x 7 Entfernungskanälen, ein Tiefenmeßbereich von 2 m bis 12 m und eine Tiefenauflösung von 10 cm [13].

CORREVIT®-Sensoren sind hochentwickelte Geräte, die als optische Filter für bestimmte Ortsfrequenzen einer Oberfläche verstanden werden können. In ihrer ursprünglichen Funktion nutzen sie eine einzige Ortsfrequenz, die über den Abbildungsmaßstab des Objektivs mit der Gitterkonstanten in Beziehung steht. Das Bild der Oberfläche enthält jedoch ein breites und kontinuierliches Spektrum von Ortsfrequenzen, die durch die Signalanalyse nicht genutzt werden. Aktuelle Projekte in der CORRSYS-Firmengruppe zielen auf die Möglichkeit, aus dem Sensor-Rohsignal Informationen über die Oberfläche zu extrahieren. Dazu wird über zwei mögliche Wege nachgedacht: Zunächst gibt es die Möglichkeit, den Sensor durch die Erfassung einer Vielzahl von Oberflächen, auf deren Unterscheidung zu trainieren. Vielversprechender ist jedoch der Ansatz, das Ortsfrequenzspektrum der Oberfläche aus dem Signalspektrum und der Übertragungsfunktion des Sensors direkt zu berechnen. Zur Demonstration dieser Idee wurde ein Einzelspalt anstelle eines Gitters in den Sensor eingebaut, da hier die Übertragungsfunktion leichter analytisch faßbar ist. Es zeigte sich, daß eine zumindest qualitative Möglichkeit zur Oberflächenunterscheidung besteht [14]. Wird daraus eine

Möglichkeit entwickelt, die eine quantitative Auswertung der Signalspektren ermöglicht, werden z. B. in industriellen Produktionsprozessen Materialien anhand ihrer Oberflächen unterschieden werden können. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer Messung mit dem Einzelspalt-Sensor auf zwei Straßenoberflächen mit starker (Beton) und schwacher Oberflächenstruktur (Epoxidharz). Beide Oberflächen sind durch den Sensor eindeutig unterscheidbar, die jeweiligen Amplituden in den niedrigen Ortsfrequenzen unterscheiden sich um eine Größenordnung. Da der Hysteresereibwert zwischen Reifen und Fahrbahn vom Ortsfrequenzspektrum der Oberfläche abhängt [15], verspricht dieses Meßprinzip die Möglichkeit der Schätzung der Oberflächenrauheit auf Verkehrsflächen, z. B. Straßen oder Rollbahnen auf Flughäfen.

Ein sehr einfacher Weg, von den Filtereigenschaften der Gitter Gebrauch zu machen, ist ihre Nutzung als effektive optische Prozessoren zur Elimination derjenigen Frequenzanteile, die von periodischen Oberflächenstrukturen erzeugt werden. Praktisch kann das durch den Einsatz zweier Gitter mit leicht unterschiedlichen Gitterkonstanten erreicht werden: Ihre CORREVIT®-Signale unterscheiden sich in den beiden Kanälen, die Periodizität der Oberfläche führt jedoch zu identischen Frequenzen dieser Anteile. Mit einem softwarebasierten Faltungsalgorithmus können sie dann im Frequenzraum eliminiert werden [16].

Obwohl mit der CORREVIT®-Technologie dynamische Größen mit vorher ungekannter Präzision gemessen werden können, besteht die Realität aus mehr als bewegten Objekten und Ortsfrequenzspektren. Objekte und Szenen haben darüber hinaus Eigenschaften

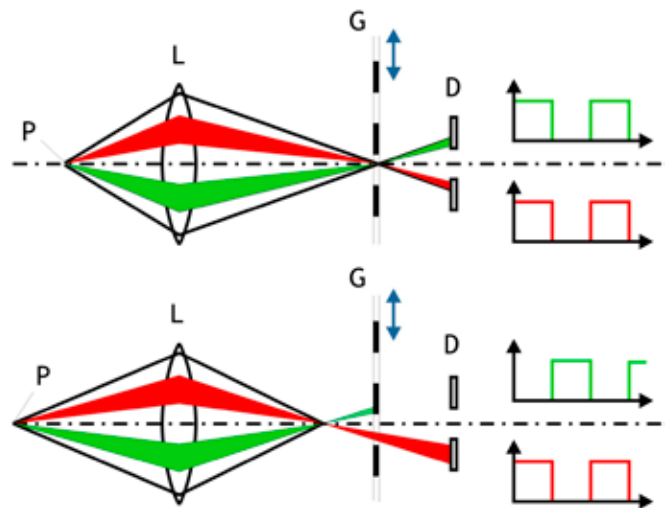


ABBILDUNG 5: Gitteroptischer Abstandssensor (schematisch), Variation des Funktionsprinzips aus Abb. 4 für statische Szenen.
P: Objektpunkt, **L:** Abbildungsoptik, **G:** schwingendes Gitter, **D:** Photodetektoren.

wie Form, Farbe, Orientierung. Diese Eigenschaften können auch mit gitteroptischen Sensoren erfaßt werden, allerdings müssen die Gitter nun diffraktive Eigenschaften haben.

Die Physiologie des menschlichen Auges läßt die Annahme zu, daß die Struktur seiner „invertierten“ Retina als dreidimensionaler gitteroptischer Korrelator verstanden werden kann [17], der mit dem Bild wechselwirkt, das wir von der realen Welt sehen. Dieser leistungsfähige 4D-RGB-diffraktiv-optische Korrelator vermag sowohl räumliche, als auch zeitliche, d. h. spektrale Information zu verarbeiten [18]. Ein schönes Beispiel für dieses Modell ist eine neue Erklärung [19] der farbigen Schatten, die zuerst von J. W. v. Goethe zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts beschrieben wurden. Farbe kann nach diesem neuen Modell als eine interferenzoptische Konstruktion verstanden werden, als Ergebnis einer Rechnung, die die resonante diffraktiv-optische Hardware des menschlichen Auges durchführt.

Diese Idee wird derzeit im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts untersucht, das von der CORRSYS 3D Sensors AG koordiniert wird [20]. Im Verlauf dieses Projekts werden die grundlegenden Nahfeld-Transformationseigenschaften dreidimensionaler Gitter mit Gitterkonstanten im Mikrometer- und Nanometerbereich demonstriert werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden in den Prototyp einer intelligenten Kamera einfließen, der drei fundamentale Sensorprinzipien demonstrieren soll:

- Farbmessung durch diffraktive RGB-Separation als Basis einer beleuchtungsadaptiven Kolorimetrie.
- Passive Erfassung von Tiefenkarten auf der Basis der dreidimensionalen chromatischen Eigenschaften der Beugungsordnungen im Nahfeld hinter dem Gitter.
- Abstrahierende Objektklassifizierung durch Analyse des Nahfeld-Beugungsmusters hinter dem Gitter.



Literatur

[1] A.S. Fitz Gerald: Photo-Electric System. US Patent No. 2,016,036, 1935.
 [2] D. Hancock, H.E. Meinema: Camera for Aerial Photography. US Patent No. 2,413,349, 1946.
 [3] K.L. King, J.C. Mathiesen: Photoelectric Drift Angle and Ground Speed Meter. US Patent No. 2,942,119, 1960.
 [4] J.T. Aator: Image Velocity Sensing by Optical Correlation. Appl. Opt., 5, 1966, 1325-1331.
 [5] E. Delingat: Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. LEITZ-Mitt. Wiss. u. Techn., VI, 1976, 249-257.
 [6] Y. Aizu, T. Asakura: Principles and Development of Spatial Filtering Velocimetry. Appl. Phys. B, 43, 1987, 209-224.
 [7] K. Heitmann, E. Schneider, H. Eisenkopf: Einrichtung zur berührungslosen Messung. Patentschrift DE 2 144 487, 1973.
 [8] K. Heitmann, E. Schneider: Einrichtung zur berührungslosen Messung. Patentschrift DE 22 09 667, 1973.
 [9] L. Leitz, K. Heitmann, E. Schneider, K.D. Schaefer: Verfahren und Einrichtung zur fotoelektrischen Bestimmung der Lage mindestens einer Schärfeebene eines Bildes. Patentschrift DE 2 330 940, 1975.
 [10] J. Haus, R. Schaefer: Optical Sensors, in: Optics Encyclopedia, eds. Th.G. Brown, K. Creath, H. Kogelnik, M.A. Kriss, J. Schmit, M.J. Weber, Wiley-VCH, 2003.
 [11] R. Schaefer, R. Rottstock, F. Erwin: Three-

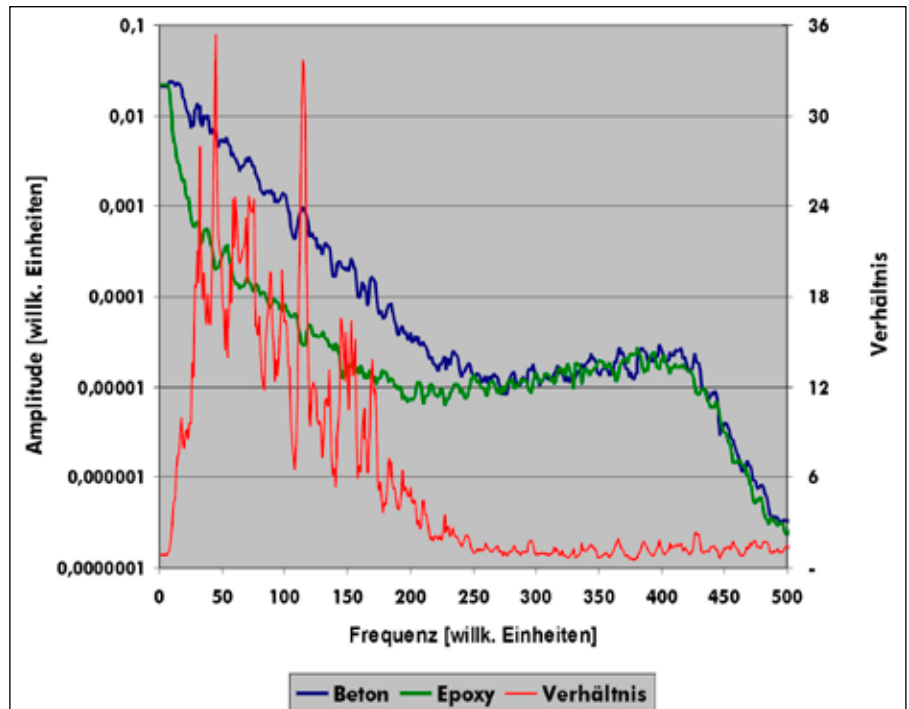






ABBILDUNG 6: Signalspektren eines Einzelspaltsensors auf zwei verschiedenen Straßenoberflächen.

axis CORREVIT® HS-CE sensor-system, ..., in: Proc. of Sensors Expo: ..., 2000, 39-46.
 [12] Landt, A.: Die wahre AF-Geschichte. Color Foto, 6/2000, 38-43.
 [13] R. Schaefer, J. Schwab: Multiple-Channel Passive 3D-Range Sensor, in: Proc. SPIE, 3100, 1997, 215-224.
 [14] J. Haus, R. Schaefer: Texturanalyse von Bandgut- und Straßenoberflächen. Techn. Messen, 70, 2003, 10-13.
 [15] M. Klüppel, G. Heinrich: Rubber Friction on Self-Affine Road Tracks. Rubber Chem. Technol., 73, 2000, 578-606.
 [16] M. Becker, B. Hock: Optischer Korrelator zur berührungslosen optischen Messung von Wegen und Geschwindigkeiten relativ zueinander bewegter Objekte. Patentschrift DE 44 09 241, 1995.
 [17] N. Lauinger: Transformation of light double cones in the human retina: ..., in: Proc. SPIE, 3208, 1997, 302-327.
 [18] N. Lauinger: 4D-RGB diffractive-optical correlator in the human eye: ..., in: Proc. SPIE, 6006, 2005, 60060Q-1-16.
 [19] N. Lauinger: Colored Shadows: Diffractive-Optical Cross-Correlations in the Human Eye: ..., in: Tribute to Emil Wolf, ed. T.P. Jansson, SPIE Press, 2005, 201-221.
 [20] Verbundprojekt: Nano- und Mikrostrukturierung von Photopolymeren und Nanokompositen als Raumgitter für die optische Sensorik – NAMIROS, 2006 - 2009. Förderkennzeichen: 13N9040.

■ Standard and OEM Design
■ Modular and Turn-Key solutions
■ Single and multi axes

POSITIONERS

Phone: +49(0)7634-50 57-0 www.micos.ws / info@micos.ws

MOTION CONTROL