

1 Einleitung

Das Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik *Heinrich-Hertz-Institut*, kurz *HHI*, ist seit dem Jahre 2002 ein Institut der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.. Ursprünglich wurde es 1928 unter der Bezeichnung *Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung* gegründet. Seine Kernkompetenzen haben sich im Laufe der Zeit, wie auch der Standort, immer wieder geändert und liegen heute in den Bereichen:

- Photonische Netze und -Komponenten
- Mobile Breitbandssysteme
- Elektronische Bildtechnik für Multimedia.

Das HHI betreibt Forschung und Entwicklung (*F&E*) auf dem Gebiet der Informationstechnik für Wissenschaft, Staat und Industrie.

Das in Abbildung 1 gezeigte Gebäude, das den heutigen Standort des HHI darstellt, befindet sich in Berlin am Einsteinufer 37, in direkter Nähe zur TU Berlin.

Anmerkung: die Kuppel auf dem Dach stammt noch aus Zeiten der *Schwingungsforschung*, als unter anderem Experimente mit Radiowellen durchgeführt wurden.



Abbildung 1: Sitz des HHI

Die strikte Umsetzung der in [2] beschriebenen Qualitätsmanagementrichtlinien führte im Jahre 2000 zu einer Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001 für den Geltungsbereich *Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Photonik*, die 2003 erneuert wurde. Ein wichtiger Bestandteil dieser Diplomarbeit ist die Berücksichtigung der schon im Leitbild des HHI formulierten Anforderungen, wie z.B. „...Sicherung der Arbeitsabläufe und Ergebnisse durch begleitendes Projekt- und Qualitätsmanagement ...“ [2].

So wie auch für das HHI, so ist die Anwendung eines Qualitätsmanagementsystems auch in Industriebetrieben unabdingbar, wenn eine gleichbleibende Produktionsqualität garantiert werden soll. Mittlerweile ist die optische Nachrichtentechnik ihren Kinderschuhen entwachsen. Die Zeit, in der die meisten Komponenten nur als Prototypen erhältlich waren, sind nun endgültig vorbei. Aus Kostengründen ist es unbedingt erforderlich, automatisierte Produktionsabläufe zu gestalten. Eine schnelle, gründliche und effektive Qualitätskontrolle ist an dieser Stelle aber genauso notwendig.

Unter diesen Gesichtspunkten ist diese Diplomarbeit entstanden. Dabei wurde neben dem reinen Aufbau des Messplatzes zur Linearitätsmessung von PIN-Fotodiode, wie in der Aufgabenstellung beschrieben, auch großen Wert auf die Einhaltung und Umsetzung der QM-Richtlinien des Unternehmens gelegt.

Im Heinrich Hertz Institut als reine F&E-Einrichtung ist die Notwendigkeit zum Test großer Stückzahlen von Testobjekten eher selten. Aber auch hier schreitet die Automatisierung voran. Ein Beispiel dafür ist das Konzept des „Virtuellen Messplatzes“, welches auf einer Initiative von Dr. Bachus beruht. Es beinhaltet, dass für immer wiederkehrende Messaufgaben standardisierte Abläufe erarbeitet werden, die eine Nachvollziehbarkeit der Messungen gewährleisten. Ein weiterer Bestandteil dieses Konzeptes ist die exakte Dokumentation des Messaufbaus und der dabei verwendeten Geräte. Mit Hilfe der Software *LabVIEW* ist es möglich, unterschiedliche Geräte über eine GPIB-Schnittstelle vom PC aus anzusteuern und damit den Messablauf vollständig oder zumindestens teilweise zu automatisieren. Dies stellt einen weiteren Aspekt dieses Konzeptes dar. Natürlich gehört zu solch einem Programm auch eine ausführliche Dokumentation. Sollte ein anderes Gerät zum Einsatz kommen, so ist es möglich, durch einfaches Austauschen des Gerätetreibers das ursprüngliche Programm weiter zu nutzen. Die Funktionsweise von *LabVIEW* sowie der Aufbau des Programms zur Ansteuerung des aufzubauenden Messplatzes wird in Kapitel 4 (*Aufbau des LabVIEW-Programms*) ausführlich beschrieben.

Die im Anhang aufgeführte Programmdokumentation ist aus diesem Grund auch als eigenständiges Dokument erstellt worden.

Das in Abbildung 2 dargestellte Modell eines prozessorientierten Qualitätsmanagementsystems wurde auch bei der Gestaltung des Messplatzes konsequent umgesetzt. Dabei ist es irrelevant, ob es sich bei der Arbeit um einen Auftrag aus dem eigenen Haus oder einen externen Auftrag handelt.

Einige Merkmale dieses Systems sollen an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben. Ausgangspunkt für die „Produktrealisierung“ (§ 7 [3]) ist die „Ermittlung der Anforderungen in Bezug auf das Produkt“ (§ 7.2.1 [3]). Praktisch wurde das durch eine ausführliche *Spezifikation* des Messablaufes sowie durch die Einhaltung bestimmter Anforderungen hinsichtlich der *Kalibrierung* der Geräte realisiert. Dies wird aber in Kapitel 3 eingehend erläutert.

Die „Überwachung und Messung des Produkts“ (§ 8.2.4 [3]) wurde einerseits durch eine Anzeige in der Benutzeroberfläche des *LabVIEW*-Programms und durch die Möglichkeit der Erstellung eines Prüfprotokolls gewährleistet. Gleichzeitig damit wird die „Lenkung fehlerhafter Produkte“ ermöglicht (§ 8.3 [3]), die besagt, dass „... ein Produkt, das die Anforderungen nicht erfüllt, gekennzeichnet und gelenkt wird, um seinen unbeab-

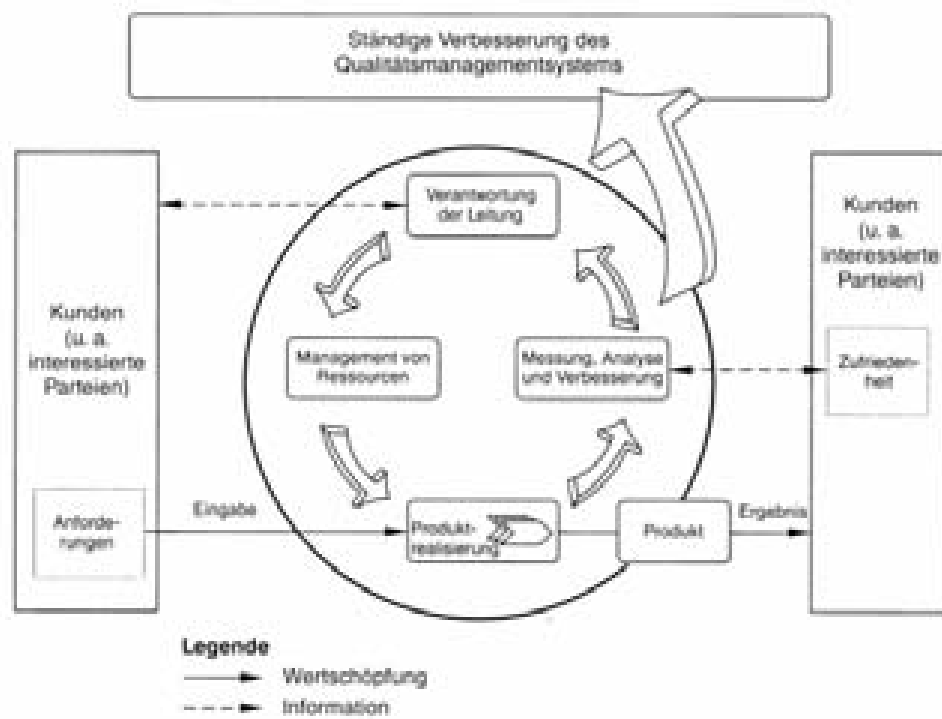


Abbildung 2: Modell eines prozessorientierten Qualitätsmanagementsystems [3]

sichtigen Gebrauch oder seine Auslieferung zu verhindern ...". Verwirklicht wird das durch eine Kennzeichnung sowohl im Programm, wie auch im Prüfprotokoll. Wird z.B. beim Test mehrerer PIN-Fotodioden, wie in dieser Arbeit, für das Prüfprotokoll eine Dateinamenskonvention verwendet, die auf der Seriennummer der Dioden beruht, so ist auch die Forderung nach „Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit“ (§ 7.5.3 [3]) erfüllt. Diese Maßnahmen werden mit dem Ziel einer ständigen „Verbesserung“ (§ 8.5 [3]) des Qualitätsmanagementsystems zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses und darüber hinaus durchgeführt.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Umsetzung der Richtlinien nach DIN EN ISO 9001:2000-12 mit dem Aufbau eines Messplatzes zur Qualitätssicherung zu demonstrieren. Als Beispiel dient die Linearitätsmessung einer PIN-Fotodiode, die für den Empfang analoger Signale geeignet ist.

Um das Messverfahren besser verstehen zu können, geht das nachfolgende Kapitel zunächst näher auf die zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen ein.

2 Grundlagen zur Linearitätsmessung

2.1 Einleitung

Nachdem im vorhergehendem Kapitel die Notwendigkeit von Qualitätskontrollen ausführlich erläutert wurde, soll nun näher auf das konkrete Beispiel eingegangen werden.

Bei dem Untersuchungsgegenstand handelt es sich um eine PIN-Fotodiode, deren Kennlinienlinearität vermessen werden soll. Das Messverfahren beruht auf dem Prinzip des idealen Mischers. Nähere Erläuterungen dazu folgen an entsprechender Stelle.

Notwendigkeit (von Linearitätsmessungen)

Empfangelemente in optischen Übertragungssystemen müssen heute immer höhere Voraussetzungen erfüllen. Eine Forderung ist die nach immer höheren Bitraten, was hohe Ansprechgeschwindigkeiten voraussetzt. Weitere Voraussetzungen sind eine ausreichende Empfindlichkeit, minimales Eigenrauschen und natürlich eine hohe *Linearität* über einen großen Wellenlängenbereich.

Dies trifft ebenso auf Fotodioden zu, die in WDM-Systemen eingesetzt werden sollen, wie auch auf solche in anderen Anwendungsgebieten. Eine Anwendung bei der es besonders auf eine hohe Linearität ankommt, ist die *analoge Übertragungstechnik*. Praktisch wird diese Technik z.B. für die Übertragung von TV-Signalen eingesetzt.

2.2 Grundlagen zu Fotodioden

2.2.1 Allgemeines zur PIN-Diode

Grundsätzlich arbeitet eine PIN-Fotodiode nach den selben Prinzipien wie herkömmliche Fotodioden. Der grundsätzliche Unterschied besteht darin, dass bei diesem Diodentyp eine zusätzliche Schicht zwischen dem eigentlichen p-n-Übergang eingebracht wird. Bei PIN-Fotodioden (**p**ositive-**i**ntrinsic-**n**egativ) liegt zwischen einer hochdotierten p^+ und n^- -Zone einer weiteren Gebiet. Dabei handelt es sich um eine sehr hochohmige Zone, die aus eigenleitendem (*i*-Gebiet), einem schwach dotiertem p-Material (π -Gebiet) oder n-Material (ν -Gebiet) aufgebaut ist. In Abbildung 3 ist der mechanische Aufbau, in Abbildung 4 der prinzipielle Aufbau und das Bändermodell dargestellt. In diesem wird ersichtlich, an welchen Stellen die Ladungsträger generiert werden. Als Entstehungsort von Ladungsträgern ist normalerweise die *i*-Zone vorgesehen. Dass auch in den anderen Schichten (*p*- und *n*-Zone) der PIN-Diode Ladungsträger freigesetzt werden, wird ebenfalls in dieser Grafik deutlich.

2.2.2 Spezielles zur Linearität

Allgemein wird bei der Berechnung des Fotostroms von einem linearen Zusammenhang zwischen einfallender Lichtleistung und generiertem Diodenstrom ausgegangen. Dies ist aber bei genauerer Betrachtung nur in einem Spezialfall, nämlich im Kurzschlussbetrieb (Gleichung 2) richtig. Abbildung 5 zeigt den realen Kennlinienverlauf.

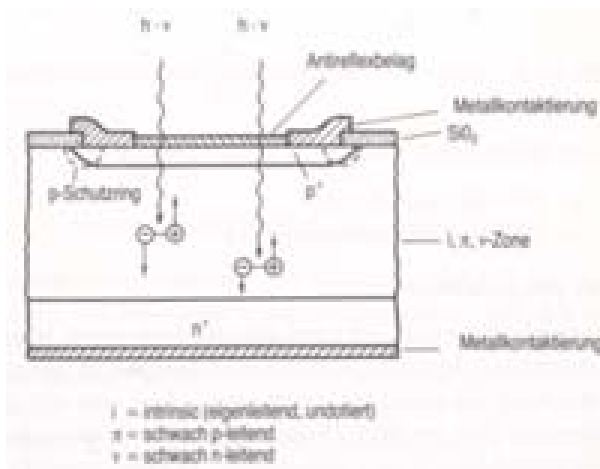


Abbildung 3: Mechanischer Aufbau PIN-Fotodiode [4]

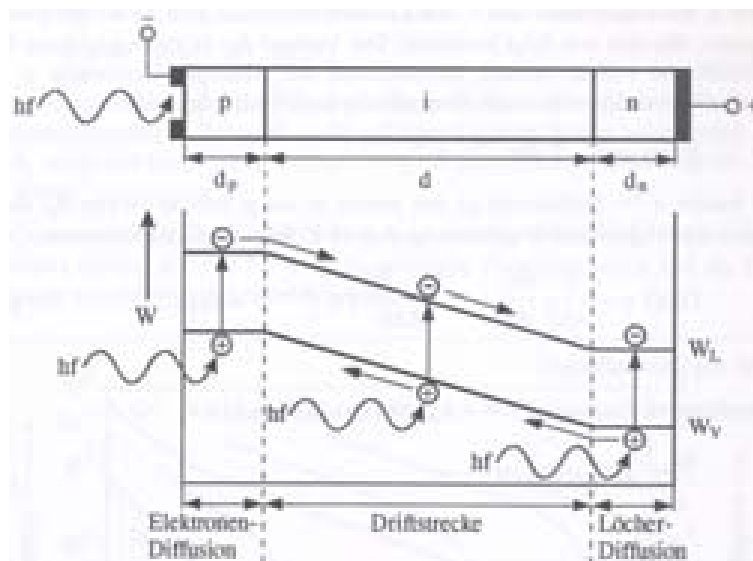


Abbildung 4: Schema einer PIN-Fotodiode mit Bänderdiagramm [5]

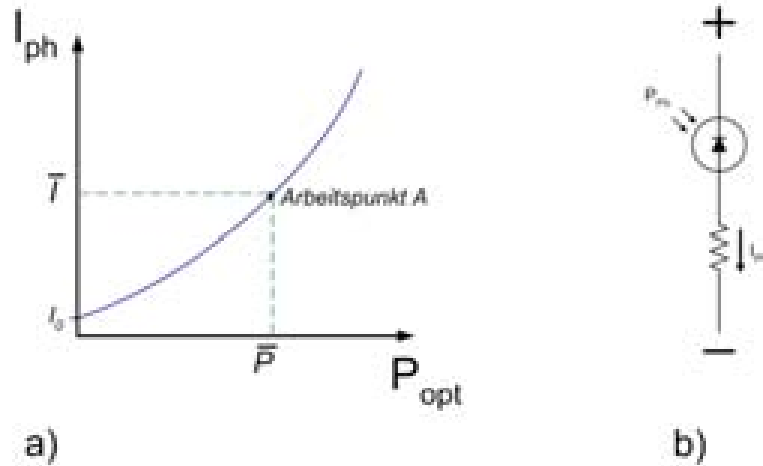


Abbildung 5: a) I-P-Kennlinie einer Fotodiode b) Beschaltung der Diode

Wie in der Diodengleichung (Gleichung 1) ersichtlich ist, besteht ein linearer Zusammenhang lediglich zwischen Fotostrom und einfallender Lichtleistung. Hierzu kommt noch ein weiterer nichtlinearer Term. Der Einfluss dieses Anteils ist erst in einem weiteren Spezialfall, nämlich dem Leerlaufbetrieb (Gleichung 3) ersichtlich.

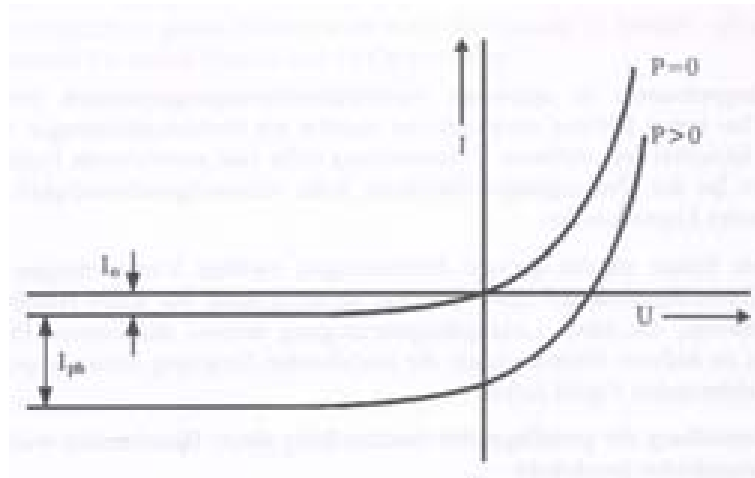


Abbildung 6: Strom-Spannungs-Kennlinie [5]

Diodengleichung:

$$I_d = I_0 \underbrace{\left(e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right)}_{\text{nichtlinearer Teil}} - I_{ph} \quad (1)$$

mit: $I_{ph} = \eta_q \frac{P_{ph}}{h\nu} e = RP_{ph}$, $U_T = \frac{k_b T}{e}$

Spezialfall *Kurzschlussbetrieb* ($U_d = 0$):

Nur in diesem Spezialfall besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Fotostrom und optischer Leistung (Gleichung 2).

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{0}{U_T}} - 1 \right) - I_{ph} = -RP_{ph} \quad (2)$$

Spezialfall *Leerlaufbetrieb* ($I_d = 0$) (Gleichungen 3 - 5).

$$0 = I_0 \left(e^{\frac{0}{U_T}} - 1 \right) - RP_{ph} \quad \Rightarrow \quad (3)$$

$$\frac{RP_{ph}}{I_0} + 1 = e^{\frac{U_d}{U_T}} \quad \Rightarrow \quad (4)$$

$$U_d = U_T \ln \left(\frac{RP_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

Wie in den vorangegangenen Gleichungen erkennbar ist, besteht in diesem Fall ein stark nichtlinearer Zusammenhang zwischen einfallender optischer Leistung und der Leerlaufspannung. Diese Betriebsform wird auch als photovoltaischer Betrieb (Fotovoltaikbetrieb) bezeichnet.

Im Normal-, Fotodiodenbetrieb (p-n-Übergang in Sperrrichtung vorgespannt) zeichnen sich PIN-Fotodioden durch eine hohe Linearität, gute Stabilität, großen Dynamikbereich und vor allem durch ihre hohe Schaltgeschwindigkeit aus. Die hohe Schaltgeschwindigkeit ergibt sich erst durch das Einbringen der *i*-Schicht. Da dieser Bereich hochohmig ist, fällt über ihn nahezu die gesamte Sperrspannung ab. Dies führt zu einer hohen Feldstärke in dieser Zone, was wiederum eine schnelle Absaugung der freigewordenen Ladungsträger zu den Elektroden bewirkt. Aufgrund dieser Eigenschaften (vor allem der Linearität) sind diese Dioden ideal als Empfangselement in der Analogtechnik.

2.3 Messverfahren

Um die nichtlinearen Effekte besser erläutern zu können, soll an dieser Stelle auf eine Anwendung näher eingegangen werden, bei der genau diese Effekte ausgenutzt werden. Es handelt sich dabei um Mischer, die zur Frequenzumsetzung in Sendern und Empfängern benötigt werden. Zusammen mit Verstärkern und Filtern gehören diese zu den wesentlichen Komponenten eines drahtlosen Übertragungssystems.

Bei der durchzuführenden Messung stellt die zu vermessende PIN-Fotodiode das nicht-lineare Bauelement dar. Allgemein gilt bei Leistungsmodulation:

$$P(t) = \bar{P}(1 + m \sin(\omega t)) \quad (6)$$

Die Ausgangsgröße ist ein elektrischer Strom $I_{ph}(P_{opt}(t))$.

Mittels eines Kopplers werden die Leistungen der beiden Signale der Frequenzen f_1 und f_2 inkohärent addiert. Das entstehende Summensignal hinter dem Koppler sei

$$\begin{aligned} P_{opt}(t) &= P_1(t) + P_2(t) \quad (7) \\ &= \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + m_1 \bar{P}_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \bar{P}_2 \sin(\omega_2 t) \end{aligned}$$

und wird dann der zu vermessenden Fotodiode zugeführt. Bei \bar{P}_1 und \bar{P}_2 handelt es sich um Gleichlichtanteile, daher können diese auch zusammengefasst werden. Mit $\overline{P_{opt}} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2$ ergibt sich für das Summensignal:

$$\begin{aligned} P_{opt}(t) &= \underbrace{\overline{P_{opt}}}_{\text{Gleichlichtanteil}} + \underbrace{m_1 \bar{P}_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \bar{P}_2 \sin(\omega_2 t)}_{\Delta P_{opt}(t)} \quad (8) \\ &= \overline{P_{opt}} + \Delta P_{opt}(t) \end{aligned}$$

Da es sich bei der Addition um eine lineare Operation handelt, kann dadurch das Entstehen neuer Frequenzen nicht erklärt werden. Diese entstehen erst durch die Wandlung der optischen Leistung in einen elektrischen Strom. Mit Hilfe der Entwicklung einer *Taylor-Reihe* ist es möglich, das Verhalten in einem Arbeitspunkt A (siehe *I-P-Kennlinie*, Abbildung 5) zu beschreiben. Somit ergibt sich mit für den resultierenden Fotostrom:

$$\begin{aligned} I(t) &= \bar{I} + \left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_A [P(t) - \bar{P}] + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial P^2} \right)_A [P(t) - \bar{P}]^2 \quad (9) \\ &\quad + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 I}{\partial P^3} \right)_A [P(t) - \bar{P}]^3 + \dots \end{aligned}$$

mit den Faktoren a_i gilt:

$$I_{ph}(t) = a_0 + a_1 \Delta P_{opt}(t) + a_2 \Delta P_{opt}^2(t) + a_3 \Delta P_{opt}^3(t) + a_4 \dots \quad (10)$$

$$a_0 = \bar{I}_{ph} = \frac{\eta e}{h f} \overline{P_{opt}}$$

Wird nun das Summenfeld eingesetzt, so erhält man:

$$\begin{aligned} I_{ph}(t) &= a_0 + a_1 \underbrace{\left(m_1 \bar{P}_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \bar{P}_2 \sin(\omega_2 t) \right)}_{\text{eigentliche Signale}} \quad (11) \\ &\quad + a_2 \left(\bar{P}_1^2 m_1^2 \sin^2(\omega_1 t) + \bar{P}_2^2 m_2^2 \sin^2(\omega_2 t) + \underbrace{2 m_1 m_2 \bar{P}_1 \bar{P}_2 \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)}_{\text{gesuchter Term}} \right) \\ &\quad + a_3 \left(m_1 \bar{P}_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \bar{P}_2 \sin(\omega_2 t) \right)^3 + a_4 (\dots)^4 + \dots \end{aligned}$$