

Untersuchung des Einflusses der Kohärenzlänge von Licht auf das Abbildungsverhalten eines mehrfasrigen Lichtwellenleiters mit modulierbarer Phase durch Simulation

Komplexe Lernleistung im Fach Physik in der gymnasialen
Oberstufe des Sächsischen Landesgymnasiums St. Afra zu Meißen

Vorgelegt von:	Rasmus Kawan
Schule:	Sächsisches Landesgymnasium Sankt Afra zu Meißen – Hochbegabtenförderung
Tag der Einreichung:	17. Januar 2022
Betreuender Fachlehrer:	Dr.-Ing. Michael Lenz
Externer Betreuer:	Herr Dipl.-Ing. Elias Scharf
Betreuender Lehrstuhl:	Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik der TU Dresden

Abstract

Die vorliegende Arbeit untersucht, wie sich das Abbildungsverhalten eines Phased Array verändert, wenn man statt harmonischen Lichtwellen transiente Lichtwellen hat, und wie sich bei inkohärentem Licht die Kohärenzlänge auswirkt.

Dazu wurde eine Simulation programmiert, welche mithilfe zufälliger Überlagerung einzelner harmonischer Pulse einen Gesamtpuls erschafft, welcher dann nicht mehr kohärent ist und dann in seine Einzelfrequenzen zerlegt wird. Dann wird für jede Frequenz an jedem Empfangspunkt eine Amplitude berechnet, und dann die aller Frequenzen an einem Empfangspunkt zusammenaddiert. Es werden die Kohärenzlänge und die Entfernung des Fokuspunkts in Z-Richtung variiert.

Die PBR und die Halbwertsbreite sind nach den Ergebnissen dieser Simulation unabhängig von der Kohärenzlänge. Das Abbild an sich unterscheidet sich nur dann zwischen transientem und harmonischen Signal, wenn der Gangunterschied zwischen minimal und maximal entferntem Punkt größer ist als die Kohärenzlänge, oder, wenn der Fokuspunkt nicht mehr senkrecht auf der Mitte des Faserbündels steht. Bei steigendem Abstand des Fokuspunkts vom Faserbündel erhöht sich die Halbwertsbreite, während die PBR mit steigender Entfernung eher abnimmt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Begriffsklärung	5
2.1	Licht als Welle	5
2.2	Licht als Strahl	5
2.3	Kohärenz	5
2.4	Laser	6
2.5	Faser	6
2.6	Phased Array	6
2.7	Fouriertransformation	7
3	Modelle für die Lichtausbreitung	8
3.1	Gaußscher Strahl	8
3.2	Strahlungsfeld bei kohärentem Licht	9
3.3	Modell für inkohärentes Licht	11
4	Implementierung des Simulationsalgorithmus	15
5	Evaluierung des Simulationsalgorithmus	17
5.1	Harmonische Intensitätsverteilung	17
5.2	Transiente Intensitätsverteilung	18
6	Ergebnisse	20
7	Zusammenfassung und Ausblick	24
	Literaturverzeichnis	25
A	Algorithmus	26

Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll es darum gehen, den Einfluss der Kohärenzlänge von Licht auf das Abbildungsverhalten eines mehrfasrigen Lichtwellenleiters mit modulierbarer Phase durch Simulation zu untersuchen. Die Problematik rührt daher, dass man zur Abbildung mit mehrfasrigen Wellenleitern mit modulierbarer Phase, Phased Arrays, bisher immer Laserlicht genutzt hat, welche kohärent und daher mit dem Wellenmodell berechenbar sind, wenn es darum geht Interferenzmuster abzubilden oder einen Punkt zu fokussieren. Um zu untersuchen, wie sich die Verwendung kohärenten, also zum Beispiel LED-Lichts, auf das Abbildungsverhalten auswirkt, soll eine Simulation programmiert werden, welche die Kohärenzlänge modellhaft in den Strahl einfließen lässt, so dass man die Werte für kohärentes Licht berechnen kann. Die dazu gewählte Simulations-Software ist MATLAB, da hier, im Gegensatz zu anderen Programmiersprachen wie Python, alle benötigten Befehle zum speichern in Arrays, zur Berechnung und zur Darstellung der Werte nicht mehr importiert werden müssen, da die Software für Simulationen dieser Art geschaffen wurde.

1 Einleitung

Phased Arrays besitzen den Vorteil, dass man mit ihrer Hilfe für Anwendungen wie zum Beispiel Endoskopie keine Linse mehr braucht, da man den Fokus durch Verschiebung der Phasen an den einzelnen Faserenden erreichen kann. Um das Phased Array auf seinen Fokuspunkt abzustimmen, muss man berechnen, welche Phasenverschiebung für die einzelnen Fasern benötigt wird. Damit man das mit Sicherheit berechnen kann, verzichtet man auf den Zufallsfaktor, den kohärentes Licht mit sich bringt, und nimmt stattdessen Laserlicht, welches eine nahezu unendliche Kohärenzlänge hat. Was aber wären die genauen Auswirkungen, wenn man kohärentes Licht benutzen würde. Um das zu ermitteln, wurde für diese Arbeit ein Algorithmus entwickelt, der die Ausbreitung von inkohärentem Licht simulieren kann.

2 Begriffsklärung

Aufgrund der Tatsache, dass diese Arbeit physikalisches Fachwissen erfordert, in das ich mich teilweise selbst auch erst einlesen musste, werden hier einige essenzielle Fachbegriffe für den Leser erläutert.

2.1 Licht als Welle

Lange Zeit war die Optik ein eigenständiges Teilgebiet der Physik, während wir sie heute in die Elektrizitätslehre einordnen können. Genauer gesagt, ist man mittlerweile zu der Erkenntnis gekommen, dass Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht und viele Eigenschaften des Lichts sich auch mit dem Wellenmodell begründen lassen. Dazu gehören die Lichtgeschwindigkeit, Interferenz, Beugung, Auflösungsvermögen, Kohärenz und Polarisation. Letztere lässt sich zum Beispiel nur mithilfe des Wellenmodells und nicht mit Licht als Strahl erklären, da die Polarisation die Ausrichtung des Feldvektors angibt, für welche man Teilchenbewegung oder zumindest Felder senkrecht zur Ausbreitungsrichtung braucht, was nur bei der Welle vorhanden ist [1].

2.2 Licht als Strahl

Die Vorteile eines Strahlenmodells sind hingegen, dass es Licht in Bündeln einfacher beschreibt. Wenn man zum Beispiel mehr als nur eine Lichtwelle betrachten will, also wenn es um die Abbildung, Spiegelung oder Brechung von Licht, eventuell reflektiert oder ausgehend von einem Objekt, geht oder das Licht, wie in unserem Fall, aus Lichtwellenleiter-Fasern kommt [1].

2.3 Kohärenz

Wenn Lichtwellen eine konstante Phasenbeziehung haben, so dass die Elongation bei Vielfachen der Wellenlänge immer gleich ist, sind sie kohärent. Wenn das aber für jede Lichtwelle gelten würde, gäbe es diesen Begriff im Kontext der Wellenoptik nicht. Licht aus gewöhnlichen Quellen, wie LEDs oder Glühlampen hat nämlich die Eigenschaft, dass die Wellenzüge nach zufälligen Längen abbrechen und phasenverschoben weitergehen. Das liegt daran, dass die Schwingung der Teilchen, durch die das Licht emittiert wird,

nicht immer gleichmäßig ist. Wenn Licht keine Kohärenz hat, ist es inkohärent und hat eine Kohärenzlänge, welche beschreibt, nach wie viel Strecke die Lichtwelle unterbrochen wird[1]. Kohärenz kann aber auch vorkommen, indem Licht nicht nur eine Frequenz hat, sondern dass aus den selben Gründen wie für die Phasensprünge, Frequenzänderungen auftreten, wodurch das Licht dann mehrere Frequenzen rund um die eigentliche Frequenz hat, die natürlich stärker vorkommen je näher sie an der Ursprungsfrequenz liegen[1].

2.4 Laser

Da die Inkohärenz des Lichtes exakte physikalische Messungen erheblich erschwert, nutzt man bei bestimmten Experimenten Laserlicht. Laser steht für "light amplification by stimulated emission of radiation", also Licht-Verstärkung, durch stimulierte Emission von Strahlung. Laserlicht wird mithilfe von 3 Komponenten erzeugt: Zunächst braucht man ein Medium, dessen Teilchen angeregt werden können, um durch ihre Schwingung Licht zu emittieren, dann braucht man einen sogenannten Pumpmechanismus, welcher dem Medium Energie zum Beispiel durch Blitzlampen oder Gasentladungen zuführt und einen optischen Resonator, welcher das emittierte Licht mit Spiegeln und ähnlichen optischen Bestandteilen verstärkt. Der Lichtstrahl, der dabei entsteht, ist nicht nur kohärent, sondern hat auch nahezu eine perfekt gleiche Frequenz und ist stark gebündelt. [2]

2.5 Faser

Eine Faser beschreibt ein Objekt, welches Licht durchlässt, dieses aber in seiner Zylinderform nur an den flachen Enden entweichen oder eintreten lässt, während das Licht innerhalb der Faser an der Mantelfläche reflektiert und dadurch von einem Ende der Faser zum anderen reflektiert wird. Für unsere Betrachtungen ist wichtig, dass eine Faser – genauer gesagt ein Faserende – als separat kontrollierbare Lichtstrahlquelle gesehen werden kann. In unserem Fall wird ein Bündel aus mehreren Fasern verwendet, da man so die Strahlen aus den einzelnen Fasern einzeln variieren kann, was beim Prinzip des Phased Array von Nutzen ist.

2.6 Phased Array

Ein Phased Array ist eine Ansammlung von Lichtquellen, meistens Fasern, die einzeln angesteuert werden können. Man kann es auch als mehrfasrigen Lichtwellenleiter bezeichnen, der modulierbare Eigenschaften hat, von denen für uns aber nur die modulierbare Phase relevant ist. Der Hauptzweck einer modulierbaren Phase ist, dass bei Betrachtung der Ausbreitungsebene über die Zeit eine Wellenfront mit bestimmtem Muster erschaffen werden kann und bei Betrachtung eines bestimmten Punktes ein Fokus erzeugt werden kann. Letzteres ist das, worum es in dieser Arbeit gehen soll. Einen Fokus erzeugt man,

indem man die Phasen des Lichtes aus den einzelnen Fasern so verschiebt, dass die Wellen aus allen Fasern an einem bestimmten Punkt gleichphasig sind, so dass es an diesem Punkt zur konstruktiven Interferenz kommt.

2.7 Fouriertransformation

Bei einer Fouriertransformation wird ein aperiodisches Signal, also ein Signal, welches sich nicht in einer gleichmäßigen Sinuskurve beschreiben lässt, in mehrere einzelne Signale zerlegt, welche verschiedene Frequenzen haben und zu verschieden großen Teilen im Ursprungssignal vertreten sind. Wenn man die entstandenen Frequenzen zu Signalen macht und diese wieder zusammensetzt, so entsteht daraus wieder das Ursprungssignal. Der Zweck des Ganzen ist, dass man so aperiodische Signale mit Formeln für periodische Signale berechnen kann. In unserem Fall wird das nötig, wenn wir mit den kohärenten Lichtwellen Amplitudenberechnungen durchführen wollen, für welche man inkohärentes Licht, also einfach eine mathematisch gleichmäßige, periodische Lichtwelle braucht.

3 Modelle für die Lichtausbreitung

Das Modell, in welchem Licht betrachtet wird, um seine Eigenschaften und seine Wirkung zu untersuchen, ist zum einen das eines Strahls, andererseits das einer Welle. Beide Modelle werden bei der Berechnung des Gauß-Strahls berücksichtigt, welche wir zu unserer Berechnung verwenden, da diese auch für die Berechnung des Strahlengangs bei Lichtfasern mit einer bestimmten Dicke geeignet ist. Außerdem müssen wir die Grundlage unserer Untersuchung, nämlich den Einfluss von Kohärenz auf das Licht, modellieren und anschließend in unsere Simulation einbauen. Wie wir das umgesetzt haben, wird im folgenden Kapitel behandelt.

3.1 Gaußscher Strahl

Der Gauß-Strahl hat seinen Namen daher, dass die Amplitude der Wellen in einer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehenden Front eine Gauß-Kurve, mit Maximum am Ausbreitungsvektor bilden:

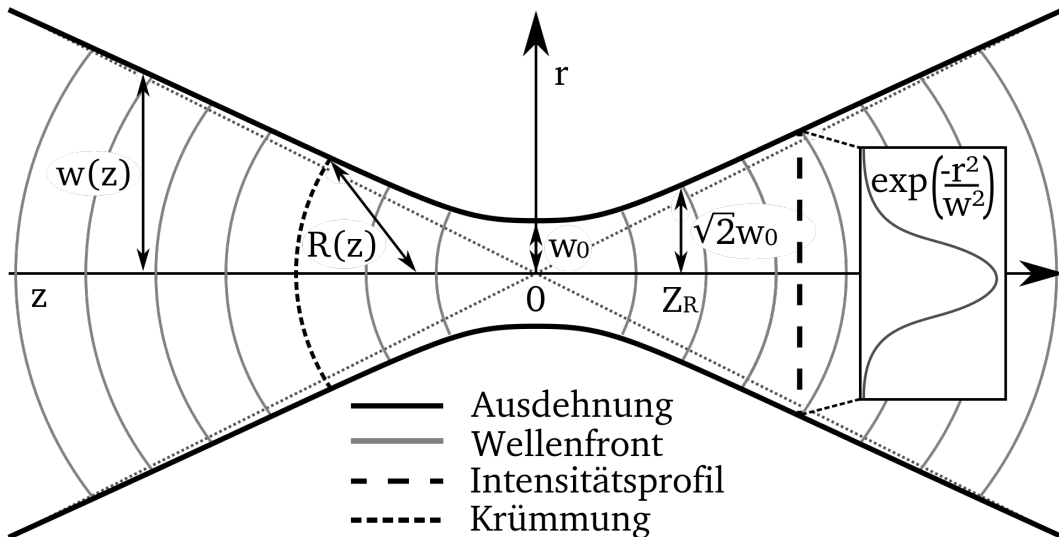


Abbildung 3.1: Amplitudenverteilung im Gauß-Strahl, Bildquelle: [3]

Die Koordinaten im Gauß-Strahl werden als zylindrische Koordinaten angegeben, also mit Distanz in Ausbreitungsrichtung z und mit Radius im Zylinder r , da die Amplitude an jedem Punkt dreh-symmetrisch um den Ausbreitungsvektor ist. Die Amplitude an einem bestimmten Punkt kann somit in Abhängigkeit dieser beiden variablen Größen wie folgt

berechnet werden:

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \cdot e^{-\left(\frac{r}{w(z)}\right)^2} \cdot e^{-ik \frac{r^2}{2R(z)}} \cdot e^{-i(kz - \theta(z))} \quad (3.1)$$

$E(r, z)$ ist dabei die Amplitude des E-Feld-Vektors der Welle, E_0 die Amplitude am Sendepunkt, welche bei uns der Vereinfachung halber standardmäßig auf 1 normalisiert ist. w_0 ist der minimale Strahlradius, also der Radius einer einzelnen Faser im Faserbündel. $w(z)$ ist der Strahlradius am Punkt z auf dem Ausbreitungsvektor, welcher so berechnet wird: $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$. Das z_R welches für die Berechnung benötigt wird ist die Rayleigh-Länge, welche vom minimalen Strahlradius und der Wellenlänge abhängig ist: $z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$, i ist die imaginäre Zahl. k ist die Kreiswellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. $R(z)$ gibt die Krümmung der Wellenfront in Abhängigkeit von z an, für diese gilt: $R(z) = z(1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2)$. $\zeta(z)$ ist die Gouy-Phase nach z , gebildet mit: $\zeta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)$. [4]

3.2 Strahlungsfeld bei kohärentem Licht

Da wir nun unsere Strahlen korrekt berechnen können, wenn sie aus einer Faser mit bestimmter Dicke gesendet werden, können wir eine erste Simulation durchführen, bei der wir von kohärentem Licht ausgehen, um dann Vergleichswerte zu haben. Das haben wir mithilfe eines Programms umgesetzt, welches von meinem externen Betreuer Elias Scharf im Rahmen vorhergehender Forschungen geschrieben wurde. Das Programm trägt den Namen „simulateMCF_2D“ und „simuliert den Ausgang einer MultiKernFaser als PhasedArray bei dem die Phasen der einzelnen Lichtquellen so geschoben werden, dass sie in der Fokusposition gleich sind.“ [5]. In unserem Programm haben wir diese Methode der Simulation auch implementiert und anschließend haben dann auf dieses Grundgerüst die Simulation mit inkohärentem Licht programmiert.

Das Strahlungsfeld bei der Aussendung von kohärentem Licht wird in der vorliegenden Arbeit nach dem Prinzip der Punktquellensynthese berechnet (vgl. Abb. 3.2).

Hierbei wird jede Einzelfaser des Lichtwellenleiters (LWL) als Quelle eines Gauß'schen Strahls aufgefasst, wobei die Strahltaile dem Durchmesser der jeweiligen Lichtfaser entspricht. Die Amplitude der elektrischen Feldstärke am jeweiligen Sendepunkt wird durch eine komplexe Zahl charakterisiert, deren Realteil der tatsächlichen E-Feldstärke entspricht und deren Phase die eventuelle zeitliche Verzögerung im Phasenschieber berücksichtigt.

Am Empfangsort werden die elektrischen Feldstärken der von den einzelnen Fasern stammenden Wellen vektoriell addiert. Zum Zwecke der graphischen Darstellung kann darüber hinaus eine Betragsbildung erfolgen.

Durch eine geeignete Phasenverschiebung im Phasenschieber ist es möglich, das Licht auf einen bestimmten Empfangspunkt zu fokussieren. Hierbei werden die Phasenverzögerungen

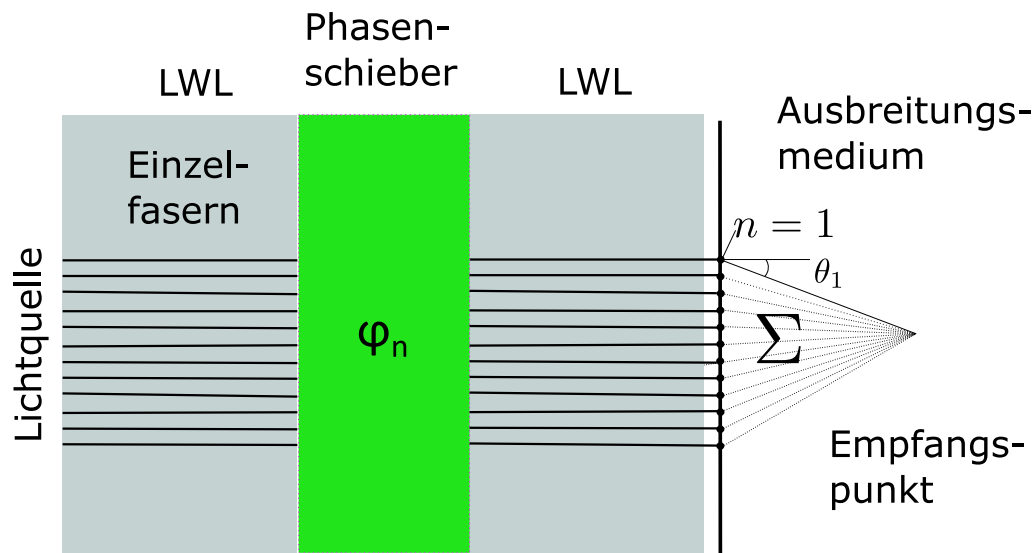


Abbildung 3.2: Modell zur Lichtausbreitung

φ_n für die einzelnen Fasern so berechnet, dass die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten im Ausbreitungsmedium ausgeglichen werden.

Praktisch bedeutet das am Beispiel des Bildes Abb. 3.2 für eine Fokussierung am dargestellten Empfangspunkt, dass das Licht der äußeren Fasern ohne Verzögerung übermittelt wird, während das Licht der weiter innen liegenden Fasern etwas verzögert werden muss, da das Licht der inneren Fasern im Ausbreitungsmedium einen geringeren Laufweg aufweist.

Im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit werden die E-Feld-Vektoren der einzelnen Wellen abweichend von der oben genannten Beschreibung (analog wie am Lehrstuhl) nicht vektoriell, sondern betragsmäßig addiert. Dies ist für die Zwecke der Aufgabenstellung eine geeignete Näherung, da der Fokuspunkt so weit vom Faserbündel entfernt ist, dass nahezu alle Lichtwellen unter dem gleichen Winkel einfallen ($\cos(\theta_i) \approx 1$). Für die Polarisation des Lichtes wird angenommen, dass das Licht aller Fasern linear polarisiert austritt und dabei $E_y = 0$ gilt.

```

1  for i=1:NN
2      n = ceil(rand*N_sig);                % Anzahl enthaltener Pulse
3      pos = ceil((N-1.5)*puls-laenge*rand(1,n)+0.5*puls-laenge);
4                                          % Position der Pulse
5      amp = rand(1,n)*2-1;                % Amplitude der Pulse
6
7      zp(i,pos)=amp;                       % Zeitpunkte
8      temp-signal = conv(puls,zp(i,:));    % Signal anlegen
9      if length(temp-signal) > N*puls-laenge % Signallaenge anpassen
10         signal(i,:)=temp-signal(1:N*puls-laenge);
11     else
12         signal(i,1:length(temp-signal))=temp-signal;

```

```

13     end;
14 end

```

Programm 3.1: Matlab-Algorithmus zum Generieren der Trainingsdaten.

3.3 Modell für inkohärentes Licht

Wie in Kap. 2.3 beschrieben, zeichnet sich inkohärentes Licht dadurch aus, dass die Signalphase nicht streng linear mit der Zeit ansteigt, sondern beispielsweise Phasensprünge hat oder die Wellenlänge lokal variiert.

Leider lässt sich die Phase von Licht aufgrund der hohen Frequenz nur sehr schwer messtechnisch bestimmen. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der Kohärenzlänge von Licht indirekt über die zugehörige Bandbreite. Diese können wir nämlich im Gegensatz zu den Phasensprüngen messen und auch modellieren, indem wir auf einen leeren Vektor, mit einer bestimmten Anzahl an Periodenlängen als Länge, mehrere, untereinander identische, deutlich kürzere Sinuspulse mit der Ursprungsfrequenz, jeweils an einer zufälligen Stelle, addieren. Das Ergebnissignal sieht dann so aus wie in Abb. 3.3 dargestellt. Durch eine Fouriertransformation (FFT) des zusammengesetzten Signals können wir die inkohärente Welle einer Ursprungsfrequenz, in Teilfrequenzen mit relativem Anteil zerlegen, um mit diesen dann einzeln die Simulation durchzurechnen und daraus die Gesamtaplitude zu bestimmen. Außerdem kriegen wir aus der FFT auch die Bandbreite raus, welche wir ja zur Berechnung der Kohärenzlänge brauchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter der Kohärenzlänge der Kehrwert der Bandbreite Δf verstanden:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\Delta f} \quad (3.2)$$

Zur Berechnung der Bandbreite Δf wird hierbei der Betrag der Fouriertransformierten der elektrischen Feldstärke mit der Dichtefunktion der Gauß'schen Normalverteilung (Gauß-Puls)

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

approximiert, wobei als Bandbreite die Standardabweichung σ angegeben wird.

Abb. 3.3 zeigt beispielhaft ein modelliertes Signal, das zugehörige Spektrum und die Approximation durch einen Gauß-Puls.

Hierzu wird entsprechend Abb. 3.5 der Betrag $E(t)$ des zu sendenden elektrischen Feldvektors zunächst mithilfe einer Fouriertransformation in seine einzelnen Spektralanteile zerlegt.

Für jede relevante Signalfrequenz wird anschließend eine harmonische Simulation mit

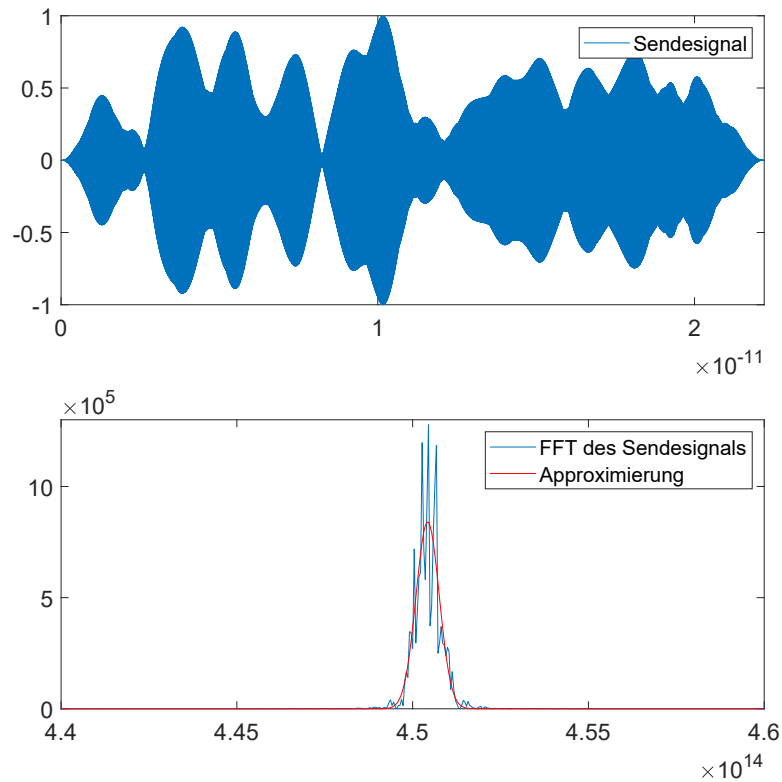


Abbildung 3.3: oben: Sendesignal (E-Feldstärke) von inkohärentem Licht; unten: zugehöriges Signalspektrum und Approximierung durch einen Gauß-Puls, $\sigma = 3,3 \cdot 10^{11}$ Hz

Punktquellensynthese entsprechend Kap. 3.2 durchgeführt, so dass für den betrachteten Punkt im Wellenfeld die Fouriertransformierten verfügbar sind.

Durch eine inverse Fouriertransformation kann aus diesen Spektralanteilen das zugehörige Zeitsignal des Vektors der elektrischen Feldstärke im Wellenfeld berechnet werden. Rechnet man die Energie (bzw. mittlere Leistung) dieses Signales aus, kann man die Lichtintensität an dem jeweiligen Punkt graphisch darstellen.

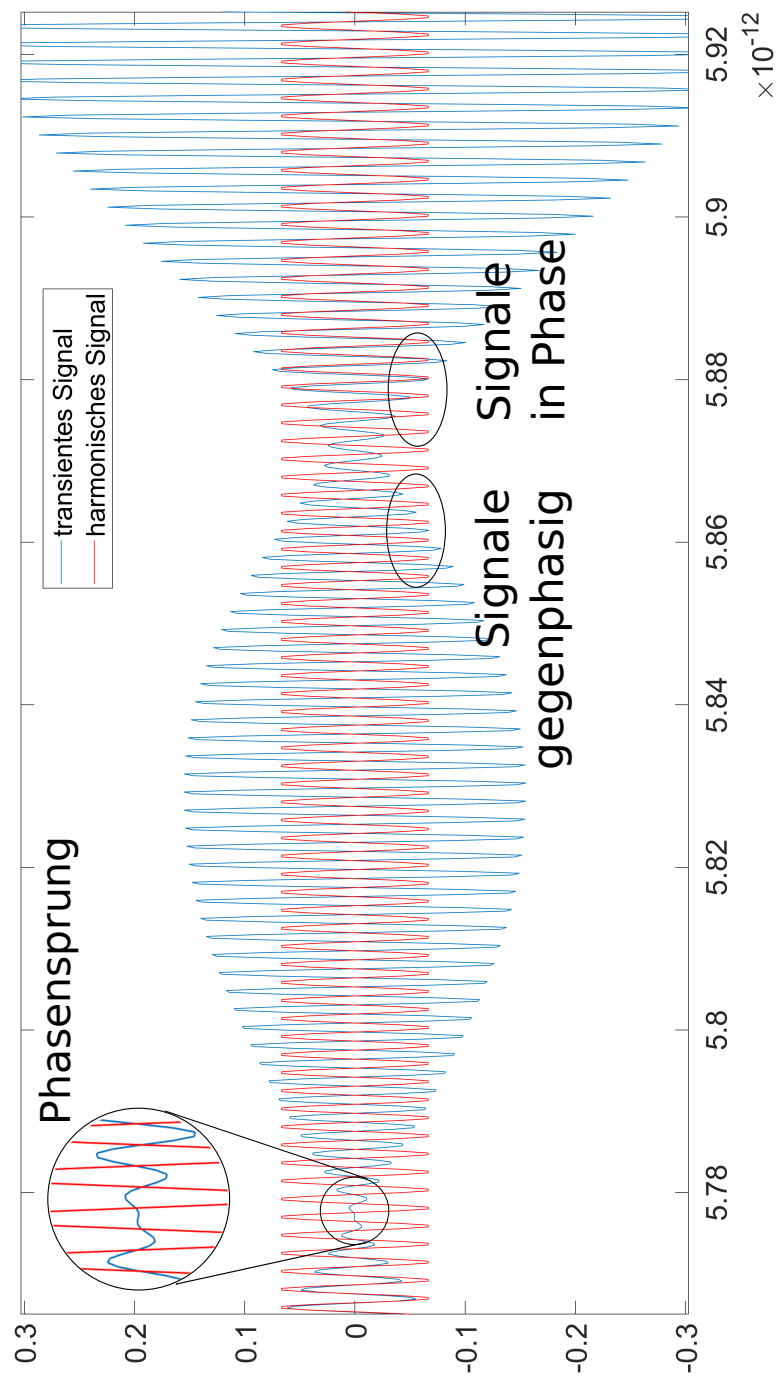


Abbildung 3.4: In einem inkorärenten Signal sind sowohl direkte Phasensprünge als auch allmähliche Phasenübergänge zu erkennen.

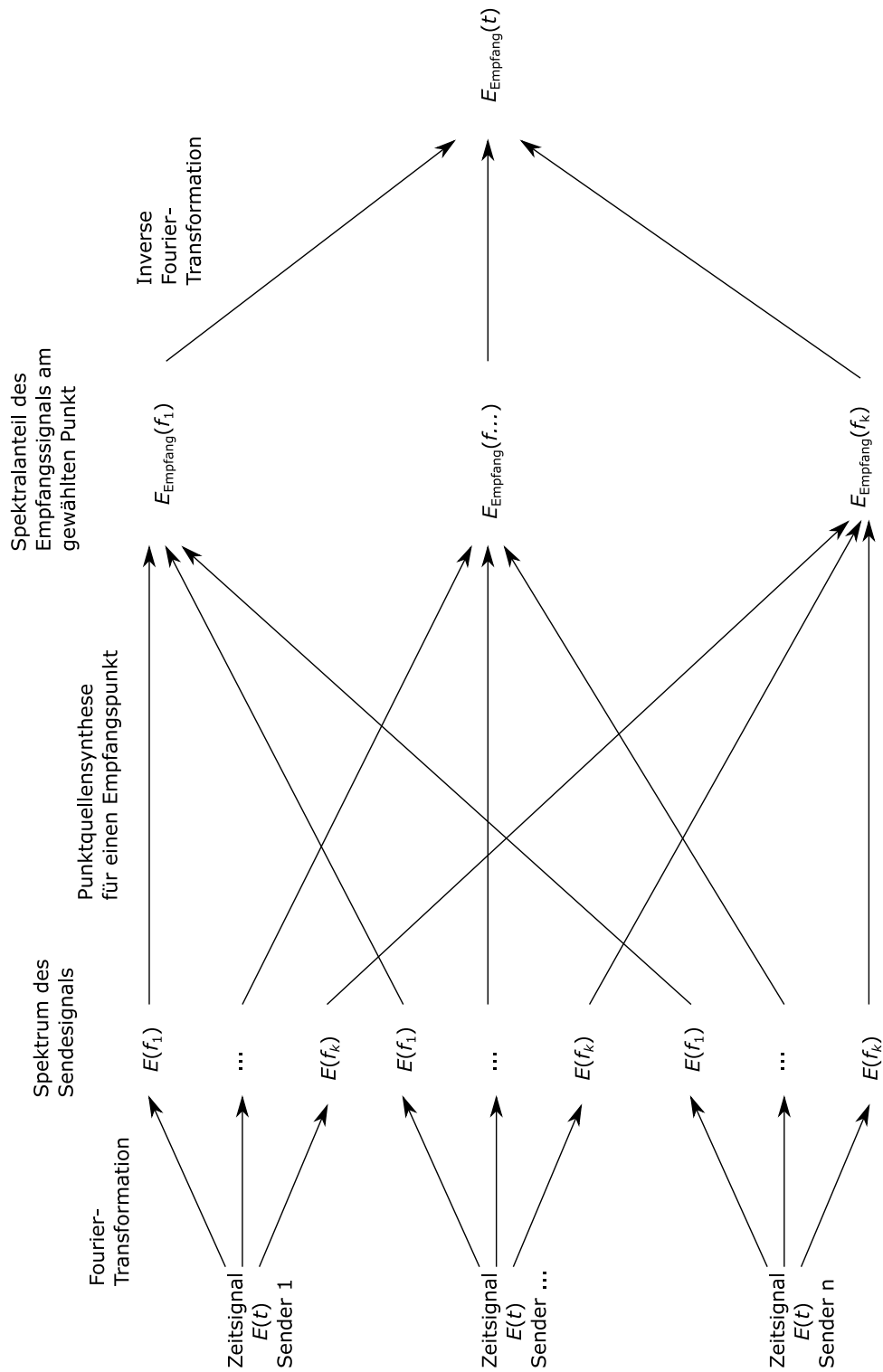


Abbildung 3.5: Modell zur Lichtausbreitung bei transientem Signal (harmonische Synthese)

4 Implementierung des Simulationsalgorithmus

Der Algorithmus zur Untersuchung unserer Fragestellung, welchen wir mithilfe der Software MATLAB programmiert und durchgerechnet haben, besteht grob gesagt aus 3 Teilen, welche mit variierendem Fokuspunkt und variierender Länge der Einzelpulse, respektiv Kohärenzlänge wiederholt werden. Zunächst werden die Sende- und Empfangspunkte generiert und abgespeichert, anschließend wird ein transientes oder harmonisches Signal erzeugt und im dritten Schritt wird aus dem Signal, ausgehend von den Sendepunkten eine E-Feld-Vektor Amplitude für jeden Empfangspunkt berechnet.

Für die Sende- und Empfangspunkte, deren X-, Y-, und Z-Koordinaten jeweils in einem Array gespeichert werden, gibt es jeweils Unterprogramme, welche aus gegebenen Variablen wie Form der Punktanordnung, Anzahl und Position der Punkte, die Koordinaten berechnen. In unserem Fall entsteht ein Kreis an hexagonal angeordneten Sendepunkten und eine Linie in X-Richtung, also mit konstantem Abstand zur Sendefläche, auf der auch unser Fokuspunkt liegt, so dass dessen E-Feld-Amplitude, welche ja für uns relevant ist, abgelesen werden kann:

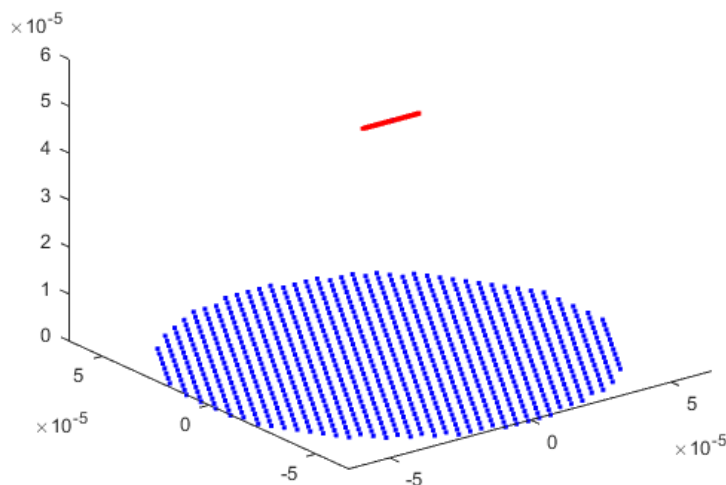


Abbildung 4.1: ·Sendepunkte ·Empfangspunkte

Die Erstellung des Sendesignals wurde ja schon in Kap. 3 beschrieben: In einer Schleife werden einzelne, kleine Sinuspulse an eine bestimmte Stelle in unser Endsignal addiert, so dass am Ende ein Array herauskommt, das das gesamte, inkohärente Signal enthält. Dieses Signal wird dann mithilfe einer Fouriertransformation (FFT) in einzelne Frequenzen und deren relativen Anteil zerlegt. Die FFT wird mit einer angenäherten Dichtefunktion einer Gaußschen Normalverteilung beschrieben:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

Dazu schicken wir das Array mit der FFT und das Grundgerüst der Dichtefunktion in eine *lsqcurvefit* Funktion, und erhalten so die beiden variablen Parameter der Gaußfunktion, σ und μ , wobei σ die Bandbreite ist. Für den Fall eines harmonischen Signals werden diese Schritte zur Zerlegung des Signals bedeutungslos, da wir hier eine einzige konstante Frequenz haben, für die wir die Berechnung später durchführen müssen. Die Bandbreite ist dementsprechend 0 und die Kohärenzlänge ∞ .

Mit den drei Grundlagen gegeben, können die jeweiligen Amplituden der E-Feld-Vektoren von den Sendepunkten für jeden Empfangspunkt berechnet und einzeln gespeichert werden. Dazu wird für jede Frequenz für jeweils alle Empfangspunkte die Summe aller Amplituden gebildet, die jeweils mithilfe des in Kap. 3 beschriebenen Gauß-Strahl-Modells berechnet werden können. Dass hier die einzelnen Amplituden und nicht die Vektoren addiert werden, wodurch theoretisch der Winkelunterschied, den die einzelnen Sendepunkte zum Empfangspunkt haben rausfällt, liegt daran, dass der Fokuspunkt so weit von der Sendeebene weg liegt, dass der Winkel vernachlässigbar ist. Aus der eben berechneten Gesamtamplitude wird dann die Leistung des Lichts an jedem Punkt berechnet, welche aber nur relativ vergleichbar ist, da sowohl die Werte der verschiedenen Frequenzen, als auch die Werte von jedem Sendepunkt zum jeweiligen Empfangspunkt zusammenaddiert werden. Außerdem hat schon die Amplitude an den Sendepunkten keine Einheit, sondern ist einfach auf 1 verallgemeinert. Jetzt wird noch die Halbwertsbreite der Leistung auf der Empfangsline bestimmt, indem man solange einen Messpunkt weiter weg vom Fokuspunkt, an welchem das Maximum liegt, geht, wie der dortige Wert nicht kleiner als die Hälfte der Maximalleistung ist:

```

1  peter = 0; %Passiv Errechnender Traeger der Entfernung zum Richtigen wert
2      while Ee((nx+1)/2+peter)>Ergebnis/2
3          peter = peter+1;
4      end

```

Programm 4.1: Schleife zur Ermittlung der Halbwertsbreite

5 Evaluierung des Simulationsalgorithmus

5.1 Harmonische Intensitätsverteilung

Um die Funktionalität des Simulationsalgorithmus zu überprüfen, wurde hier die selbe Messung mit den selben Sendepunkten ($ns = 10000$), dem selben Fokuspunkt ($f_x = 100\mu m, f_y = 0\mu m, f_z = 50\mu m$), einmal harmonisch und einmal transient durchgeführt. Diesmal wurde ein Punkt außerhalb der optischen Achse gewählt, um den Gangunterschied zwischen den Sendepunkten größer zu machen als die Kohärenzlänge, dem selben Messbereich ($xe = 0 : 200\mu m, ze = 50\mu m$) und der selben Grundwellenlänge ($\lambda = 666nm$). Hier zunächst das Ergebnis dieser Simulation mit kohärentem Licht:

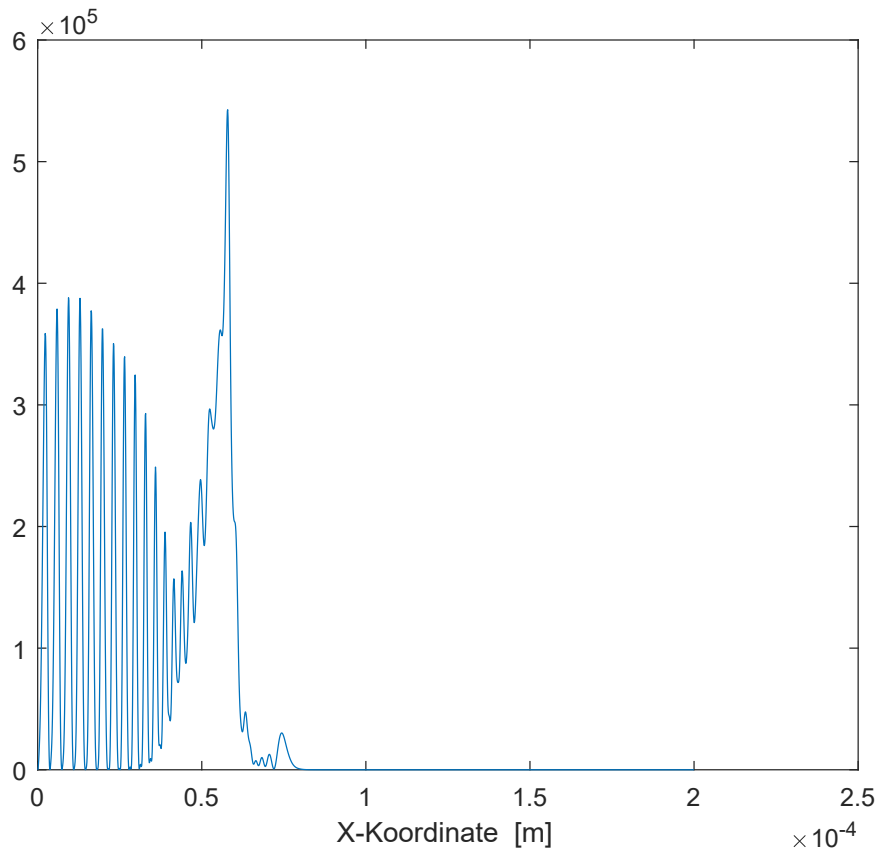


Abbildung 5.1: relative Amplitude bei einem harmonischen Sendesignal

5.2 Transiente Intensitätsverteilung

Die entsprechende Amplitudenverteilung mit den selben Werten bei inkohärentem Licht mit der Kohärenzlänge $\Delta\lambda = 8,05\mu m$ sieht so aus:

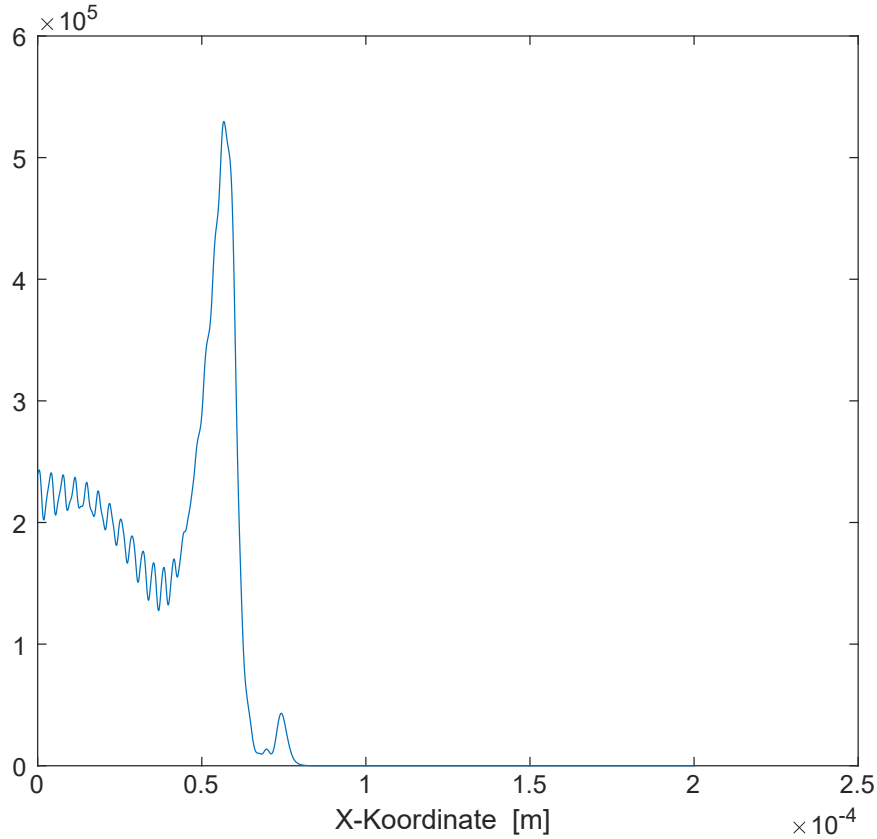


Abbildung 5.2: relative Amplitude bei einem transienten Sendesignal

Der erste Unterschied, der sich erkennen lässt ist, dass die Minima beim kohärenten Licht bei 0 liegen, während das inkohärente Licht keine wirklichen Minima hat. Das liegt daran, dass die Interferenzminima abhängig von der Wellenlänge respektiv Frequenz ist, von der es ja beim transienten Signal mehrere gibt, weshalb beim Minimum einer der Wellenlängen immer eine andere gerade einen Wert $\neq 0$ hat. Was man außerdem erkennen kann ist, dass die ganz feinen Minima und Maxima auf den großen Minima und Maxima beim kohärenten Licht nicht so stark ausgeprägt und teilweise gar nicht vorhanden sind. Etwas was bei beiden gleich ist ist das Maximum, welches bei beiden bei $60\mu m$ liegt.

Da das Maximum nicht am Fokuspunkt liegt, könnte man meinen dass beide Simulationen falsch sind, aber man den Fehler nicht sieht, weil es der gleiche ist. Diese These kann damit widerlegt werden, dass auch bei der dritten Simulation dieser Art mit dem Algorithmus von Elias Scharf das selbe Bild wie bei der ersten, harmonischen Simulation, rauskommt:

Der Algorithmus funktioniert also und es treten Unschärfeerscheinungen auf, die zu erwarten waren beziehungsweise erklärbar sind. Somit ist er zur Simulation von inkohärentem

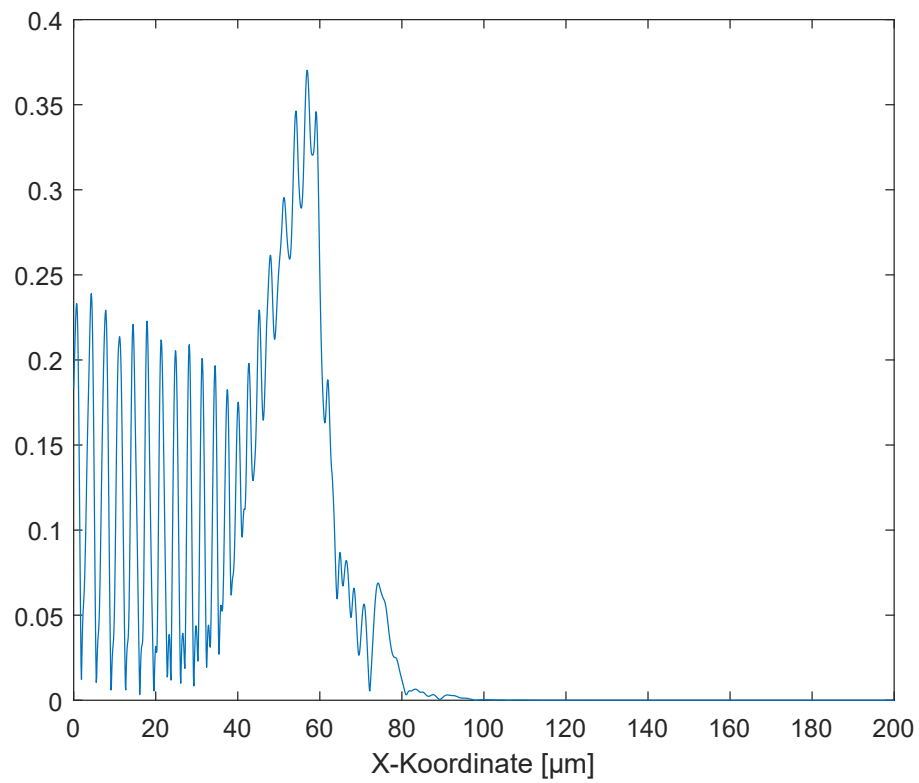


Abbildung 5.3: Amplitude bei harmonischem Signal mit dem Algorithmus von Elias Scharf

Licht mit transientser Welle geeignet.

6 Ergebnisse

Anders als zur Evaluierung des Algorithmus, lag der Fokuspunkt bei der Hauptmessreihe auf der optischen Achse, da so die genaue Fokussierung vereinfacht wird und deshalb auch in der Praxis die relevante Anwendung ist. Die Entfernung des Fokuspunkts in Z-Richtung sowie die Länge der Einzelpulse zur Signalbildung, und damit die Kohärenzlänge des Lichts, wurden variiert.

Da in den Auswertungen die Kohärenzlänge als Eingabewert genommen wird, obwohl sie eigentlich genau so ein Ausgabewert ist wie die andere, von ihr abhängig betrachtete Größe, geht es hier zunächst um den Zusammenhang zwischen der Länge der Einzelpulse und der Kohärenzlänge:

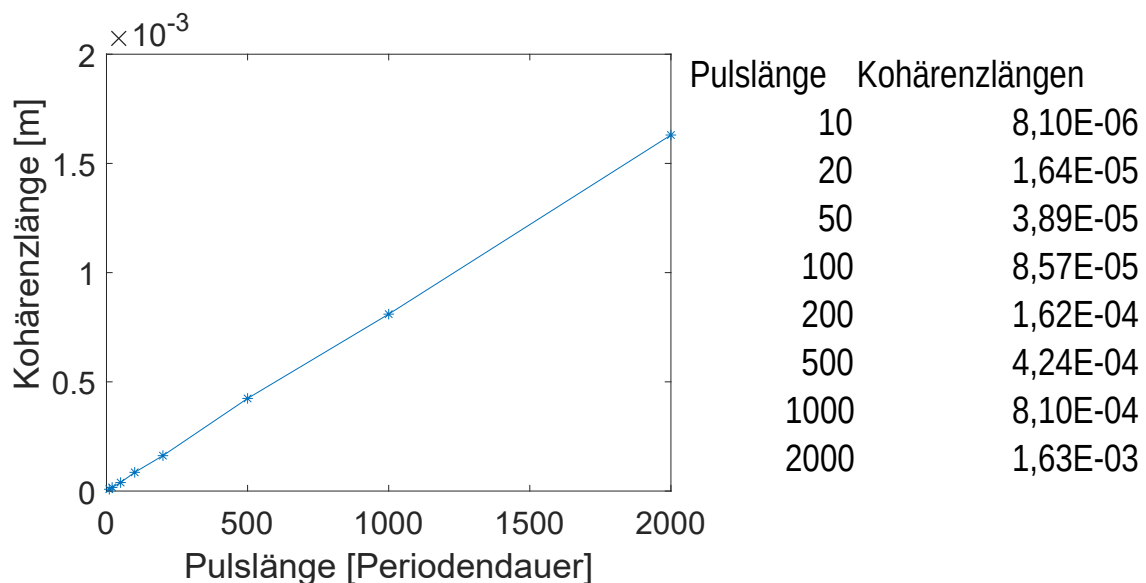


Abbildung 6.1: Kohärenzlänge in Abhängigkeit von der eingegebenen Einzelpulslänge

Bis auf ganz kleine Abweichungen von der Geraden sind die beiden Größen linear abhängig. Die Schwankungen hängen damit zusammen, dass kein rationaler Prozess, sondern eine zufällige Signalgenerierung die Kohärenzlänge bestimmt.

Als nächstes geht es um die Qualität des Bilds, in Abhängigkeit von der Kohärenzlänge, bei einer konstanten Entfernung $f_z = 250\mu m$. Dazu untersuchen wir die Peak-to-Background Ratio (PBR), also das Verhältnis von Maximalwert der Amplitude, zu denen im Hintergrund, wo keine Interferenz stattfindet:

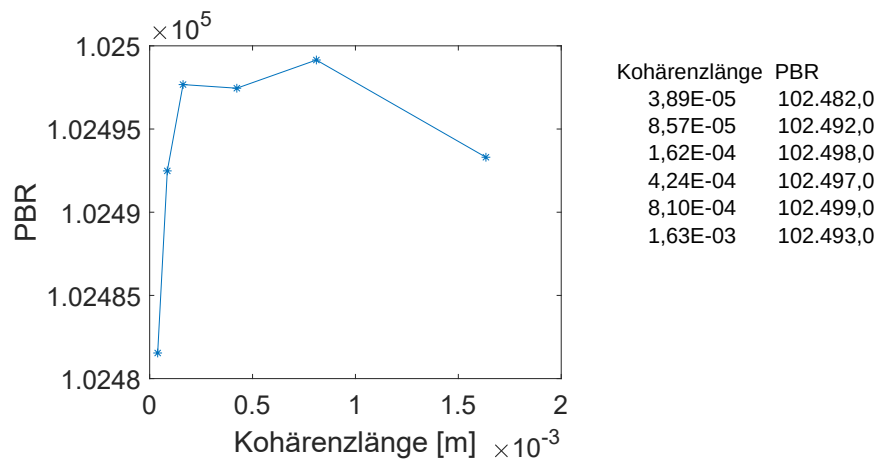


Abbildung 6.2: PBR in Abhängigkeit von der Kohärenzlänge

Auch wenn es auf den ersten Blick so aussieht, als ob die PBR-Werte zufällig und sehr stark variieren würden, sieht man in der Tabelle, dass eigentlich alle Werte nahezu identisch sind. Da bei einer schlechteren Abbildung die Energie am Fokuspunkt sinken und die im Hintergrundrauschen steigen würden, würde dabei entsprechend ein niedrigerer PBR Wert rauskommen. Da das nicht der Fall ist kann man sagen, dass sich anhand des PBR-Wertes nicht feststellen lässt, dass eine hohe Kohärenzlänge ein ungenaueres Abbildungsverhalten zur Folge hat.

Genau so wie die PBR, kann man auch die Halbwertsbreite des generierten Bilds in Abhängigkeit von der Kohärenzlänge darstellen. Die Halbwertsbreite gibt an, wie breit der Bereich ist, in dem die Empfangsenergie mindestens halb so groß ist, wie die am Maximum, beziehungsweise Fokuspunkt:

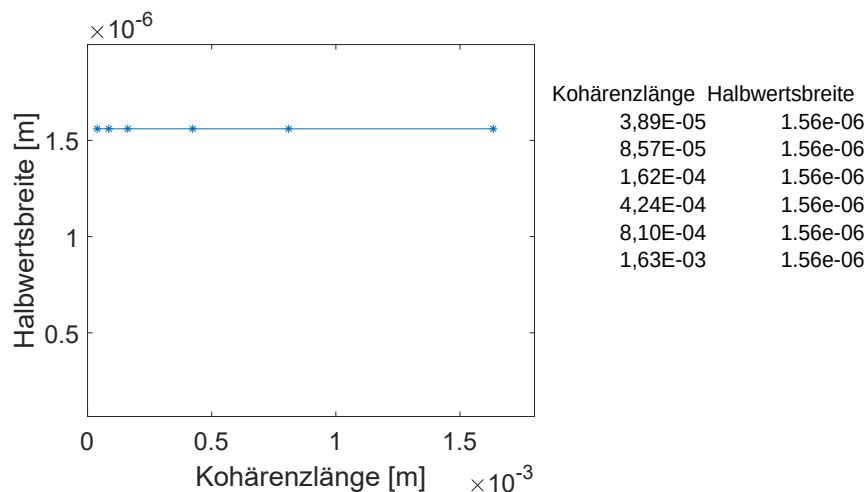


Abbildung 6.3: Halbwertsbreite in Abhängigkeit von der Kohärenzlänge

Auch hier gibt es wieder keinen Zusammenhang mit der Kohärenzlänge, geschweige denn unterschiedliche Werte. Da die Halbwertsbreite in gewisser Weise die Qualität des Fokus darstellt, weil eine niedrige Halbwertsbreite ja gleichbedeutend mit höheren Amplituden, näher am Fokuspunkt, müsste es eigentlich mit der Erhöhung der Kohärenzlänge eine

Verbreiterung der Halbwertsbreite geben. Die hier zur Berechnung verwendeten Werte, haben aber keinen Einfluss auf die Halbwertsbreite, oder zumindest nur einen, der geringer ist als unsere Abtastrate entlang der X-Linie ($\frac{1}{50}\mu m$).

Die andere Variable Größe in unserer Simulation ist die Entfernung des Fokuspunkts auf der optischen Achse. Wie schon bei der Kohärenzlänge kann man auch hier wieder untersuchen, wie sich die Halbwertsbreite und die PBR bei variierendem Abstand ändern, während diesmal die Kohärenzlänge mit $\Delta\lambda = 4,24E - 04$ konstant ist:

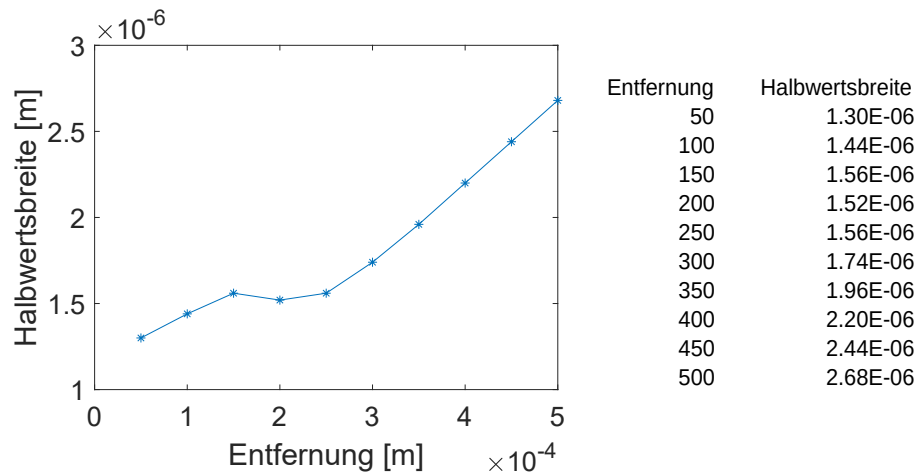


Abbildung 6.4: Halbwertsbreite in Abhängigkeit von der Entfernung

An dieser Grafik zur Abhängigkeit der Halbwertsbreite von der Entfernung des Fokuspunkts in Z-Richtung sieht man, dass mit zunehmender Entfernung die Halbwertsbreite auch tendenziell zunimmt. Diese Entwicklung war vorhersehbar, da sich mit größerer Entfernung der Abstand zwischen den Maxima und somit auch die Breite der Maxima erhöht. Was außerdem auffällt, ist das lokale Maximum bei $150\mu m$ und das absinken der Halbwertsbreite in den darauffolgenden Entfernungen. Das liegt vermutlich daran, dass bei den ersten 3 Punkten bis $150\mu m$ noch nicht alle Sendepunkte aufgrund der Form des Gauß-Strahls, relevante Werte an den Empfangspunkt senden, was dann ab einer Entfernung von $200\mu m$ so langsam der Fall wird. So langsam meint, dass nicht bei $200\mu m$ plötzlich alle anderen, vorher fehlenden, Sendepunkte mitsenden, sondern dass bis zur 6. Entfernung bei $300\mu m$ immer neue Sendepunkte dazukommen, was man auch daran sieht, dass die Steigung nach dem Abfall von $150\mu m$ zu $200\mu m$ erst allmählich wieder mehr wird. Natürlich kann man

auch hier wieder die PBR untersuchen, diesmal aber wie eben schon bei der Halbwertsbreite in Abhängigkeit von der Entfernung:

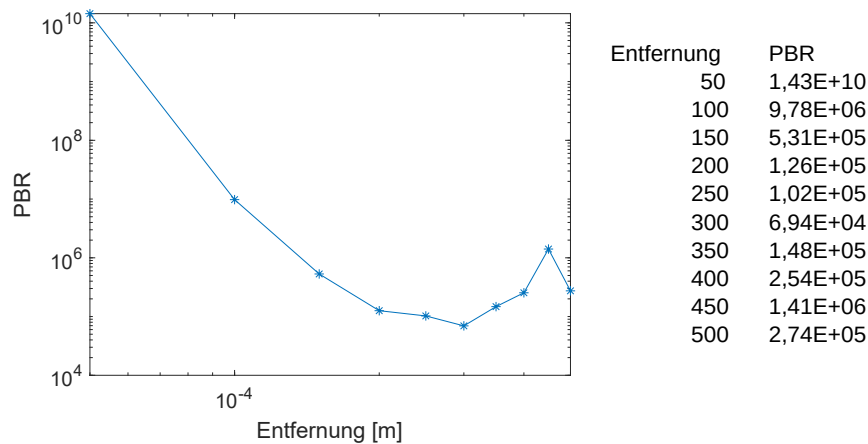


Abbildung 6.5: PBR in Abhängigkeit von der Entfernung

Hier sieht man, dass es zwar eine Änderung gibt, diese aber ohne eine logarithmische Darstellung beider Achsen fast garnicht sichtbar wäre. Außerdem gibt es keine klar erkennbare Tendenz, da die darübergelegte Kurve sowohl steigt, als auch sinkt, und das sowohl exponentiell, als auch ohne erkennbaren Übergang. Das liegt vermutlich daran, dass die PRB immernoch die fehlerbehaftetste Größe ist. So reicht ein Nebenmaximum oder -minimum und die PBR, welche ja ein Quotient ist, ändert sich massivst. Der exponentielle Ab- und wieder Anstieg den man sieht könnte damit zusammenhängen, dass diese Nebenextrema ihren Abstand zum Hauptmaximum ja auch abhängig von der Entfernung ändern. Der plötzliche Abfall am Ende könnte daran liegen, dass dort gerade ein lokales Minimum, welches vorher noch im Messbereich lag, die minimale Amplitude jetzt nicht mehr reduziert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich auf der optischen Achse, also mit einem mittig ausgerichteten Fokuspunkt keine Auswirkung der Kohärenzlänge feststellen lässt. Verschiebt man aber den Fokuspunkt weg von der optischen Achse, so sieht man klare Unschärfeerscheinungen. Das liegt daran, dass erst bei stark radial verschobenem Fokuspunkt genügend Gangunterschied zwischen den nächsten und den entferntesten Sendepunkten besteht, damit die verwendeten Kohärenzlängen wirken können. Da sich eine Kohärenzlänge berechnen ließ und mit transientem Signal auch teilweise andere Abbildungen rauskamen als bei einem harmonischen, kann man festhalten dass der Ansatz des Algorithmus und die Umsetzung des transienten Signals wie erwünscht gelungen ist. In Zukunft kann der Algorithmus als Grundgerüst für weitere Berechnungen, die mit inkohärentem Licht arbeiten, taugen.

Literaturverzeichnis

- [1] Joachim Grehn and Joachim Krause. *Metzler Physik* -. Bildungshaus, Braunschweig, 2007. ISBN 978-3-507-10710-6.
- [2] Patrick Voss de Haan. *Laser*. Spektrum Akademischer Verlag, 1998.
- [3] Aleph. Gauß-strahl, 2021. URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3807143>. Dateiversion vom 03.08.2021.
- [4] D. Meschede. *Optik, Licht und Laser*. Teubner Studienbücher Physik. Vieweg+Teubner Verlag, 2015. ISBN 9783663109549. URL <https://books.google.de/books?id=HVCHBwAAQBAJ>.
- [5] E. Scharf. simulatemcf_2d.m. URL <https://github.com/DynamoPikachu/BeLL-Code>.

A Algorithmus

Der Algorithmus ist online unter: <https://github.com/DynamoPikachu/BeLL-Code> zu finden. Um die von mir entwickelte Simulation durchzuführen müssen sie einfach alle Dateien in den selben Ordner runterladen und anschließend `Transiente_Analyse.m` in MATLAB ausführen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Insbesondere bei Herrn Dr. Lenz, für die Zeit und Mühe die er in diese Arbeit gesteckt hat und dabei immer geduldig und hilfsbereit war. Genauso natürlich bei Herrn Dipl. Ing. Elias Scharf, der mich und diese Arbeit auch durch stundenlange Konferenzen und Telefonate bis hier gebracht hat.

Dann natürlich auch bei Herrn Röpke, als mein GM, der mich bei der Planung und dem Zeitmanagement unterstützt hat, und als mein Physiklehrer, der die Grundlagen für diese Arbeit gelegt hat.

Ich danke Liah für das Korrekturlesen der Arbeit und meiner Etage 18.2 für die mentale Unterstützung und die gegenseitige Motivation.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Untersuchung des Einflusses der Kohärenzlänge von Licht auf das Abbildungsverhalten eines mehrfasrigen Lichtwellenleiters mit modulierbarer Phase durch Simulation“ selbstständig, ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel verfasst habe. Sämtliche Stellen, die wörtlich oder inhaltlich anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies trifft besonders auch auf Quellen aus dem Internet zu. Gleichzeitig gebe ich das Einverständnis, meine Arbeit mittels einer Plagiatsoftware durch die Schule überprüfen zu lassen.

Ort, Datum: _____

Unterschrift: _____