

# Analogieversuche zur Quantenphysik – Quantenradierer und Quantenkryptographie

## *Justieranleitungen und Messprotokolle*



Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum für Lehramtskandidaten

### A) Justierung Mach-Zehnder-Interferometer (Quantenradierer-Aufbau)

1. Fixieren Sie den Laser an einem Ende des optischen Breadboards.
2. Stellen Sie sicher, dass der Laser in  $45^\circ$  polarisiert ist, indem Sie einen auf  $-45^\circ$  eingestellten Polarisator vor den Laser stellen und den Laser solange im Halter rotieren, bis durch den Polarisator effektiv kein Licht mehr fällt. Dann entnehmen Sie den Polarisator wieder aus dem Aufbau.

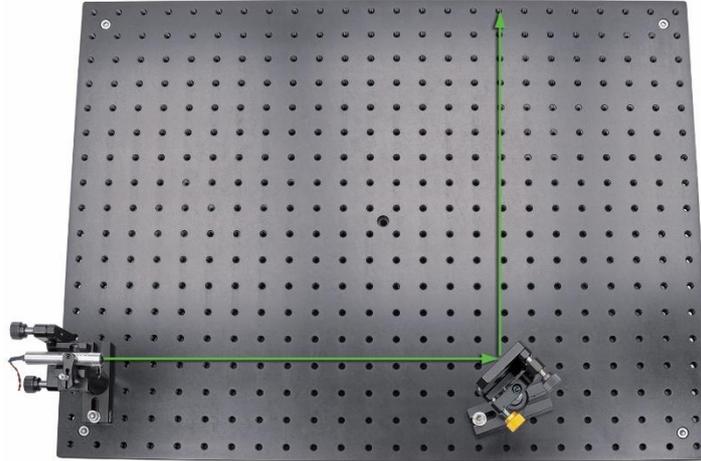


Abb. 1: Laseraufbau

3. Schrauben Sie dann einen der Spiegel am anderen Ende des Boards fest, sodass der Laser in einem  $90^\circ$  Winkel davon reflektiert wird. Richten Sie den Laserstrahl idealerweise am Lochraster der Platte aus, wie in Abb. 1 skizziert. Passen Sie die Höhe beider Komponenten an, sodass der Strahl den Spiegel in der Mitte trifft und auch möglichst parallel zur Plattenoberfläche verläuft. Für die Einstellung der Höhe können Sie die zur Verfügung stehende Irisblende verwenden.
4. Setzen Sie nun einen der Strahlteiler zwischen Laser und ersten Spiegel (Pfad 1), sodass der Strahl in zwei aufeinander senkrechte Teilstrahlen zerlegt wird.

Der Strahl, der nun den Pfad 2 bildet, muss dann über den zweiten Spiegel so reflektiert werden, dass der reflektierte Strahl parallel zum ersten Strahl in Pfad 1 verläuft. Es sollte auf etwa gleiche Abstände in beiden Armen geachtet werden.

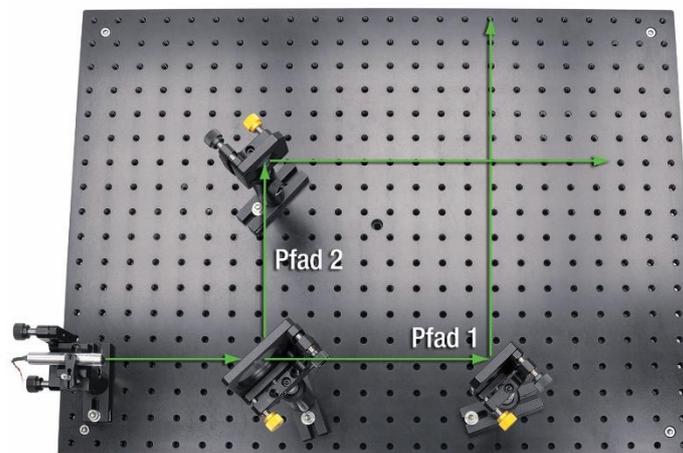


Abb. 2: Spiegel- und Strahlteileraufbau

5. Achten Sie wieder darauf, dass der Strahl parallel zum Lochraster steht und justieren Sie die Höhe der Komponenten ein.
6. Bringen Sie den zweiten Strahlteiler am Schnittpunkt der beiden Teilstrahlen in den Aufbau ein.
7. Stellen Sie dann einen der Beobachtungsschirme relativ nah hinter dem Strahlteiler auf (Schirm 1), den anderen in einem Abstand von etwa 2-3 Metern. Ziel ist es nun, beide Teilstrahlen zu überlagern, sodass sie interferieren können.
8. Zunächst werden Sie höchstwahrscheinlich zwei Laserspots auf den Schirmen sehen. Sie müssen nun versuchen, diese beiden zu überlagern. Sie können die Spots nun mit Hilfe der Feinjustierschrauben an den Spiegel- und den Strahlteiler-Mounts positionieren.  
Hinweis: Wenn Sie die Schrauben an einem Spiegel verstellen, wird sich der Laserspot an beiden Schirmen in unterschiedliche Richtungen bewegen (also einer nach links und der andere nach rechts oder umgekehrt). Drehen Sie den Strahlteiler, dann bewegen sich beide Spots an den Schirmen in die gleiche Richtung.

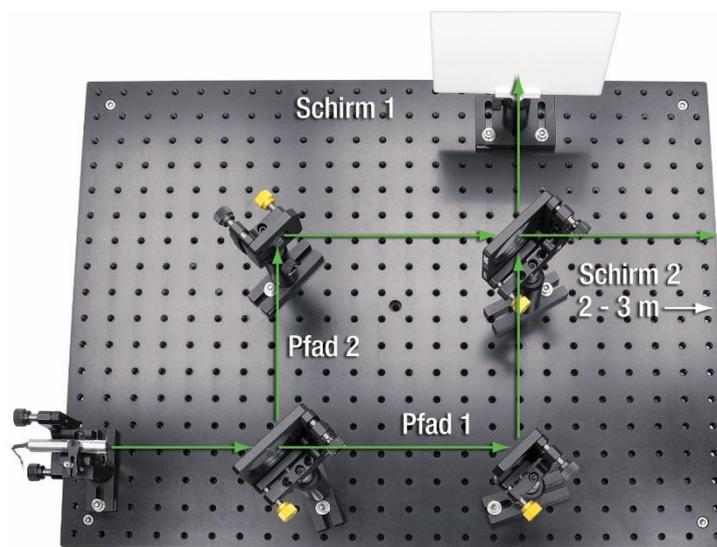


Abb. 3: Beobachtungsschirme und Ausrichtung

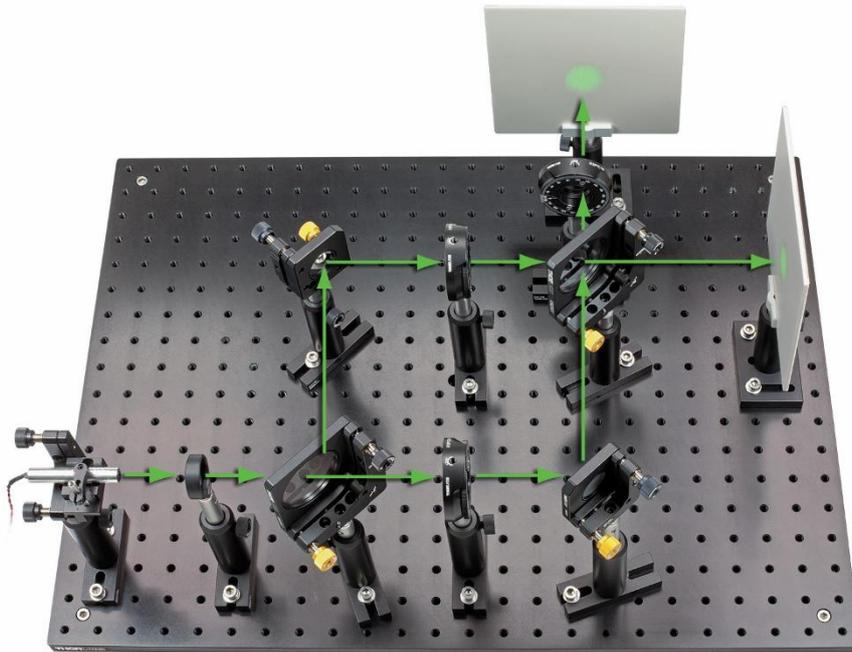
9. Stellen Sie das Interferometer so ein, dass die Strahlen insbesondere am zweiten Strahlteiler gut überlappen! Es genügt nicht, dass die Spots nur auf den Schirmen gut aufeinander liegen. Ist dies nicht der Fall, muss entweder die Einstellung der Spiegel oder die Position des Strahlteilers entsprechend geändert werden. Ein Interferenzmuster wird nur dann erkennbar sein, wenn die Strahlen gut am zweiten Strahlteiler und den Schirmen überlagern.
10. Sie können auch einen sogenannten „Beam Walk“ anwenden. Hierbei handelt es sich um eine in der Optik sehr verbreitete, iterative Methode, um optische Strahlen mittels zweier kinematischer Elemente auszurichten. Diese beiden Elemente sind in unserem Fall der erste Strahlteiler und ein Spiegel Ihrer Wahl. Diese werden nun verändert, um den Strahl auf zwei „Ziele“ einzustellen, nämlich die Spots auf dem zweiten Strahlteiler und auf einem der Schirme. Gehen Sie wie folgt vor:
  - i. Justieren Sie den ersten Strahlteiler so lange, bis die beiden Spots auf dem zweiten Strahlteiler möglichst gut überlappen.
  - ii. Justieren Sie nun den von Ihnen gewählten Spiegel so, dass die beiden Spots am Schirm möglichst gut übereinanderliegen.

Wiederholen Sie diese beiden Schritte nun so oft, bis die Spots sowohl am Strahlteiler als auch am Schirm optimal übereinander liegen. Setzen Sie dann die Linse ein. Wenn Sie das

Interferenzmuster noch nicht sehen, dann drehen oder neigen Sie langsam einen der Spiegel. Finden Sie immer noch kein Muster, müssen die vorherigen Schritte wiederholt werden.

11. Wenn Sie ein Interferenzmuster erhalten haben, können Sie schließlich in jedem Pfad einen Polarisator platzieren. Bei gleichgestellten Polarisations Ebenen erhalten Sie Interferenz, bei gekreuzten verschwindet sie. Der dritte Polarisator („Radierer“) kann schließlich noch direkt vor einen der Schirme gesetzt werden.

**Hinweis:** Bei der Reflexion des Lichts entweder an Spiegeln oder Strahlteilern wird teils die Polarisation ein wenig gedreht. Um möglichst wenige Fehler zu erhalten hat sich die Positionierung der Polarisatoren wie in Abb. 4 bewährt.



*Abb. 4: Gesamter Aufbau des Interferometers mit Polarisatoren*

## B) Justierung Kryptographie-Aufbau

### Sensorelektronik

Die Sensorelektronik hat neben dem Anschluss für das Netzteil (2) noch zwei Sensoreingänge (1). Sie sind völlig identisch, welchen Sensor man wo anschließt ist daher egal.



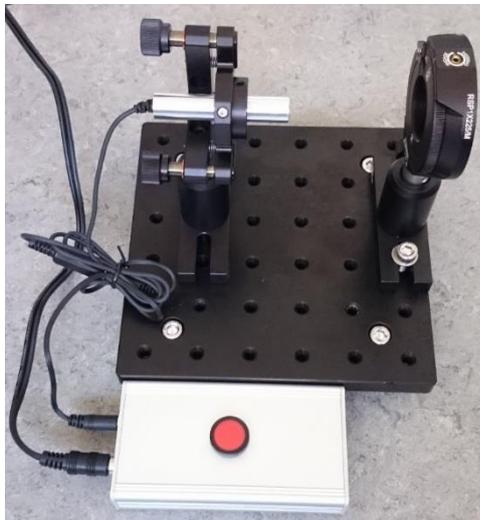
Die Sensorelektronik hat weiterhin einen grünen Knopf, mit dem zwischen dem „Justiermodus“ und dem „Messmodus“ umgestellt wird. Beim **Justiermodus** leuchtet die seitliche LED **gelb**. Ist dieser Modus aktiviert, dann leuchten **BEIDE** blauen LEDs an den Sensoren, wenn ein Laserpuls mit gleicher Intensität bei Ihnen eintrifft – das entspricht den Fällen, bei denen die Basen von Alice und Bob nicht übereinstimmen.

Der **Messmodus**, bei dem die LED **grün** leuchtet, verhält sich im Fall unterschiedlicher Basen anders: Er wählt zufällig eine der beiden blauen LEDs aus und lässt diese aufleuchten. Dies simuliert die „Entscheidung“ eines einzelnen Photons, das am Strahlteiler mit 50% Wahrscheinlichkeit transmittiert oder reflektiert wird.

### Weitere Vorbereitungen

Wir starten mit dem Grundaufbau, da noch einige Einstellungen vorgenommen werden müssen.

Stellen Sie zunächst die Breadboards von Alice und Bob in größerem Abstand zueinander auf und setzen Sie einen Laser auf Alice's Board. Nehmen Sie nun die Höhenjustierhilfe und stellen Sie sicher, dass der Laser parallel zum Tisch verläuft, indem Sie den Laserhalter verkippen. Setzen Sie dafür die Justierhilfe abwechselnd nah vor den Laser und weit entfernt. Führen Sie dasselbe für den zweiten Laser durch.



Bauen Sie nun Alice wie im Bild dargestellt auf. Verwenden Sie einen Drehhalter mit den Einstellungen „-45, 0, 45, 90“.

Betätigen Sie den roten Feuerknopf 2 Sekunden lang, dann geht der Laser in den Dauerstrichmodus über. Dies erleichtert die Justierung sehr. Richten Sie den Laser und den Polarisationsdreher so aus, dass der Laserstrahl möglichst in die Mitte der  $\lambda/2$ -Platte fällt. Die Höhe des Lasers und des Polarisationsdrehers müssen Sie später ggf. mit der Aufbauhöhe von BOB noch abstimmen. **Der Drehhalter zeigt zum Laser.**

Bauen Sie nun auf das Breadboard von Bob eine  $\lambda/2$ -Platte (ebenfalls mit einem Drehhalter mit den Einstellungen „-45, 0, 45, 90“) und den Strahlteiler. Der Halter der  $\lambda/2$ -Platte zeigt zum Strahlteiler.

*Diesen Halter braucht man nur zur Justierung, später hat Bob nur „0, 45“!*



### ***Justierung für Alice und Bob***

Alice und Bob sollen sich in etwa 60 cm Abstand gegenüber stehen. Es ist sinnvoll, die beiden Breadboards möglichst parallel aufzustellen.

- Bauen Sie den Laser und die  $\lambda/2$ -Platte von Alice mittig auf dem kleinen Breadboard auf. Der Halter hat die Einstellungen „-45, 0, 45, 90“ und zeigt zum Laser. Stellen Sie Alice' Laser auf Dauerbetrieb ein (2 Sekunden roter Knopf).
- Bauen Sie die  $\lambda/2$  –Platte von Bob auf, direkt am Rand des Breadboards. Der Halter hat nur die Einstellungen „0, 45“. Er zeigt von Alice weg.
- Stellen Sie einen der Sensoren so ans andere Ende von Bobs Breadboard, dass er möglichst gerade im Strahl steht und der Laser in die Öffnung fällt.
- Stellen sie den Strahlteiler in den Aufbau. Er soll möglichst senkrecht zum Strahl stehen.
- Stellen Sie den zweiten Sensor so in den Aufbau, dass er das Loch trifft und
  - senkrecht zum Strahl steht, der vom Strahlteiler reflektiert wird.
  - sein Abstand zum Strahlteiler gleich dem Abstand des ersten Sensors zum Strahlteiler ist.

Der Aufbau sollte jetzt so aussehen:



*Abbildung 1: Alice und Bob*

### **Nun kommt die Feinjustierung.**

- Stellen Sie die Sensorelektronik in den Justiermodus (=seitliche LED leuchtet gelb).
- Stellen Sie beiden Polarisationsdreher auf  $0^\circ$  ein und drücken den Feuerknopf kurz. Es sollte die blaue LED auf dem Sensor aufleuchten, der im gerade durchlaufenden Strahl sitzt. Wenn das nicht der Fall ist, prüfen Sie:
  - Ob der Sensor wirklich senkrecht zum Strahl steht.

- Ob der Laser sauber in das Loch vor der Photodiode fällt, also
  - ob Sie die Höhe richtig eingestellt haben
  - ob der Laser mittig in das Loch fällt

Wenn dieser Sensor richtig eingestellt ist und die LED nach einem Schuss angeht, dann wird der zweite Sensor justiert:

- Stellen Sie die  $\lambda/2$ -Platte bei Alice auf die Skalenanzeige  $90^\circ$  ein (Bob bleibt bei  $0^\circ$ ). Nun sollte die LED am zweiten Sensor leuchten, wenn man einen Schuss macht.
- Zur Vereinfachung der Einjustierung des zweiten Sensors kann der Strahlteilerwürfel mit dem kinematischen Halter verkippt und gedreht werden.

Nun müssen die anderen Fälle getestet werden:

Bei den Einstellungen „ $45^\circ$ “ und „ $-45^\circ$ “ von Alice sollten BEIDE LEDs leuchten. Es kann sein, dass die beiden vorigen Fälle klappen, aber z.B. der  $45^\circ$ -Fall nicht. Dann war die Feinjustierung noch nicht gut genug. Prüfen Sie alternativ, dass Sie im Justiermodus sind, also die seitliche LED an der Sensorelektronik gelb leuchtet.

Insgesamt muss man **8 Fälle** ausprobieren, die **alle** funktionieren müssen, bevor man den Versuch starten kann:<sup>1</sup>

Alice	Bob	Welche LED leuchtet	Bit
$-45^\circ$	$0^\circ$	Beide	Zufall
$0^\circ$	$0^\circ$	Geradeaus	0
$45^\circ$	$0^\circ$	Beide	Zufall
$90^\circ$	$0^\circ$	Reflektiert	1

Alice	Bob	Welche LED leuchtet	Bit
$-45^\circ$	$45^\circ$	Geradeaus	0
$0^\circ$	$45^\circ$	Beide	Zufall
$45^\circ$	$45^\circ$	Reflektiert	1
$90^\circ$	$45^\circ$	Beide	Zufall

Wenn alle Fälle funktionieren, können Sie die Sensorelektronik in den Messmodus umschalten (LED springt von gelb auf grün).

Sollten z.B. nur 7 von 8 Fällen funktionieren, muss trotzdem die Justierung so lange verfeinert werden, bis alle 8 Fälle funktionieren, da sonst das Experiment nicht sinnvoll durchgeführt werden kann.

**Wichtig:** Der Aufbau sollte während des ganzen Experiments nicht bewegt werden. Auch sollte man sich nicht auf den Tisch aufstützen! Dies kann den Aufbau dejustieren, wenn sich der Tisch durchdrückt!

### **Einbau von Eve**

Stellen Sie für den Einbau von Eve das große Breadboard zwischen die Breadboards von Alice und Bob. Didaktisch sollte vermieden werden an Alice und Bob Veränderungen vorzunehmen, da Eve ja nur „unbemerkt“ abhören soll. Justieren Sie dementsprechend Eve ohne Veränderungen an Alice oder Bob.

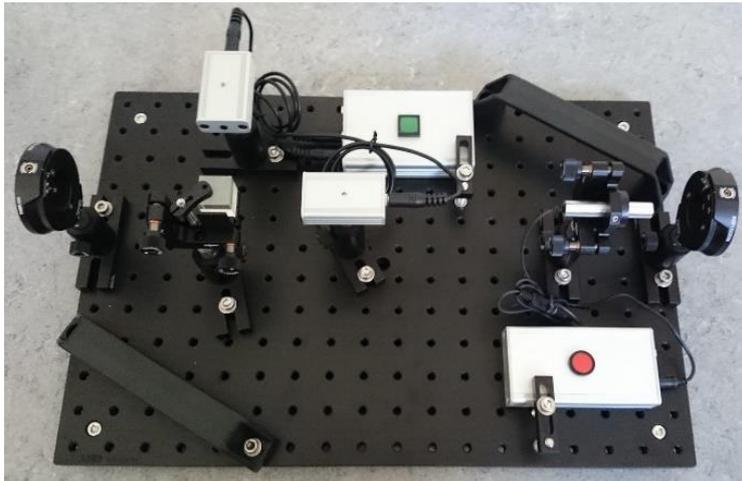
- Bauen Sie den Empfangsteil von Eve auf. Das erfolgt völlig analog zum oben beschriebenen Aufbau von Bob (Sensorelektronik auf Justiermodus schalten, LED leuchtet gelb!). Testen Sie, dass alle 8 Fälle zwischen Alice und dem Empfangsteil von Eve

<sup>1</sup> In die Tabelle ist zur Hilfe noch der Bit-Wert aufgenommen. Ist die Sensorelektronik im Justiermodus, dann leuchten beide LEDs. Ist die Sensorelektronik im Messmodus, dann leuchtet nur eine LED; welche ist zufällig.

funktionieren. Stellen Sie danach die Sensorelektronik wieder vom Justier- in den Messmodus.

- Bauen Sie den Sender von Eve auf. Dazu müssen Sie den Laser so einstellen, dass beide Sensoren von Bob gut getroffen werden. Dies erfordert etwas Fingerspitzengefühl (und auch wieder die Sensorelektronik im Justiermodus). Stellen Sie auch hier wieder sicher, dass alle 8 Fälle zwischen der Sendeeinheit von Eve und Bob funktionieren und am Ende in den Messmodus umgestellt wird.
- Die Laser- und die Sensorelektronikbox können mit Klemmen am Breadboard befestigt werden. Das erleichtert die Herausnahme von Eve.

Der fertige Aufbau von Eve sieht folgendermaßen aus:



*Abbildung 2: Eve*

### C) Messprotokolle und Binär-code-Tabelle

#### Messprotokoll zur Schlüsselerzeugung – ALICE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ba																		
Bi																		

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Ba																		
Bi																		

	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Ba																
Bi																

Ba = Basis ( + oder x ) Bi = Bit ( 0 oder 1 )

Winkeleinstellung (Erinnerung)	Basis +	Basis x
Bit 0	0°	-45°
Bit 1	90°	45°

Erzeugter Schlüssel:

-----

#### Tabelle zur Verschlüsselung der Nachricht – ALICE

Bu																
D																
S																
V																

Bu = Buchstabe, D = Datenbit (Buchstabe in binärer Darstellung, 4 x 5 Bit)

S = Schlüsselbit, V = Verschlüsseltes Bit zum Senden

**Messprotokoll zur Schlüsselerzeugung – BOB**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ba																		
Bi																		
Bi(E)																		

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Ba																		
Bi																		
Bi(E)																		

	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Ba																
Bi																
Bi(E)																

Ba = Basis ( + oder x )    Bi = Bit ( 0 oder 1 )  
 Bi(E): Bits mit eingebauter Eve

Erinnerung	transmittiert	reflektiert
Basis + ( =0° )	0	1
Basis x ( =45° )	0	1

Erzeugter Schlüssel:

-----

**Tabelle zur Entschlüsselung der Nachricht – BOB**

E																		
S																		
D																		
Bu																		

E = Empfangenes Bit, S = Schlüsselbit, D = Datenbit (4 x 5 Bit), Bu = Buchstabe

## Basiswahl – EVE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ba																		

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Ba																		

	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Ba																

## Binäre Darstellung des Alphabets

A	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	1
C	0	0	0	1	0
D	0	0	0	1	1
E	0	0	1	0	0
F	0	0	1	0	1
G	0	0	1	1	0
H	0	0	1	1	1
I	0	1	0	0	0
J	0	1	0	0	1
K	0	1	0	1	0
L	0	1	0	1	1
M	0	1	1	0	0
N	0	1	1	0	1
O	0	1	1	1	0
P	0	1	1	1	1
Q	1	0	0	0	0
R	1	0	0	0	1
S	1	0	0	1	0
T	1	0	0	1	1
U	1	0	1	0	0
V	1	0	1	0	1
W	1	0	1	1	0
X	1	0	1	1	1
Y	1	1	0	0	0
Z	1	1	0	0	1