

Beschreibung der Erfindung

Titel

Polarisationskoppler

Internationale Patent Klassifikation (Vorschlag)

5 H01S 3/05, H01S 3/08, H01S 3/23, H01S 5/10, H01S 5/14,
H01S 5/40

Technisches Umfeld der Erfindung

Die Erfindung bezieht sich auf die Steigerung der Leistungsdichte von Lasern, insbesondere Halbleiterlasern, indem mehrere Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge mittels
10 eines neuen Verfahrens der Polarisationskopplung überlagert werden.

Hintergrund und Stand der Technik

Jeder Laser besteht aus einem laseraktiven Bereich, englisch
15 als "gain" und deutsch als „Verstärkungsbereich“ bezeichnet, in dem von außen zugeführte Energie mittels stimulierter Emission in kohärente Strahlung umgewandelt wird. Dazu ist ein Laserresonator notwendig, der dafür sorgt, dass jeweils ein Teil der entstehenden Strahlung wieder in den
20 Verstärkungsbereich zurück geleitet wird, wofür er mindestens ein Rückkoppellement enthält, typischerweise einen teildurchlässigen Spiegel. Dieser Resonator bestimmt über seine Geometrie und seine Rückkoppeligenschaften die physikalischen Eigenschaften des Laserlichts, nämlich vor
25 allem das räumliche Profil, die Wellenlängen, die Bandbreite und die Polarisation.

Die dabei erzielbaren Werte hängen unter anderem vom Verstärkungsmaterial und den Resonatoren ab und sind meist reziprok untereinander und mit der erzielbaren
30 Ausgangsleistung korreliert. Verbesserungen einzelner

Parameter führen also in der Regel zu Verschlechterungen bei anderen.

Von besonderer praktischer Bedeutung sind Halbleiterlaser, da sie sehr klein sind, direkt elektrische Energie in Licht
5 umwandeln, einen hohen Wirkungsgrad besitzen und mit etablierten Techniken der Halbleiter-Produktionstechnologie preiswert in großen Stückzahlen hergestellt werden können. Der Resonator ist dabei gleich mit integriert, indem reflektive Schichten auf die Endflächen aufgebracht werden und/oder
10 Brechungsindex-Gitter epitaktisch eingebracht sind.

Gegenwärtig ist ihre maximale Ausgangsleistung beziehungsweise die erzielbare Leistungsdichte allerdings noch zu gering für viele hochinteressante Anwendungen. Das beruht darauf, dass die Lichterzeugung in Volumina geschieht, die deutlich kleiner
15 als 1 mm^3 sind, und deshalb die auftretenden Leistungsdichten bei weiterer Erhöhung der Pumpleistung zur Zerstörung des Bauteils führen würden. Der Ausweg, die Volumina zu vergrößern, stößt schnell an Grenzen, da dann die Modenselektivität des Resonators abnimmt und sich deshalb die
20 Strahlqualität verschlechtert, so dass die Leistungsdichte im Wesentlichen konstant bleibt. Auch Ansätze, die Selektivität zu erhöhen, indem das Verstärkungsmaterial substrukturiert wird (DE 43 38 606, DE 36 11 167), helfen nur wenig.

Ein seit langem praktizierter Weg, die Leistung zumindest zu
25 verdoppeln, besteht in der Überlagerung zweier Laser orthogonaler Polarisation mittels eines Polarisationsstrahlteilers, wodurch das resultierende Licht unpolarisiert wird.

Es ist bekannt (z.B. WO 03/055018), dass sehr kompakte externe
30 Resonatoren die Strahlqualität von Hochleistungs-Diodenlasern bei hohen mittleren Leistungen drastisch verbessern können. Trotzdem müssen für noch höhere Strahlleistungen mehrere solche Laser gleichzeitig betrieben werden. Dadurch sinkt üblicherweise die Strahlqualität bzw. die Möglichkeit, den
35 Strahl auf kleine Foci zu konzentrieren, deutlich ab. Die erzielbare Leistungsdichte bleibt praktisch konstant. Um

dieses Problem zu überwinden, wurde von Daneu et.al. (Opt. Lett., Vol. 25, No.6, pp. 405-407) und Sanchez-Rubio (US 6.192.062) spektrales Multiplexen vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, bei dem mehrere Laserquellen auf jeweils unterschiedlicher Wellenlänge betrieben werden, so dass sie über ein geeignet gewähltes Element, meist ein Gitter, räumlich überlagert werden können. Darauf aufbauend gab es weitere Patenteinreichungen (z.B. WO 03/036766, WO 20/02091077). Diese Patente haben alle gemeinsam ein zentrales dispersives Element (Prisma oder Gitter) auf dessen einer Seite die verschiedenen Laseremissionen kollinear verlaufen, also Strahlquerschnitt und Emissionsrichtung weitgehend identisch sind. Auf der zweiten Seite des Elements werden die verschiedenen Emissionen durch die Dispersion räumlich aufgefächert, so dass jede einzelne Richtung mit einem Laser der entsprechenden Wellenlänge betrieben werden kann. In der Regel handelt es sich um Laser, deren einer Rückkoppelspiegel erst auf der gemeinsamen Strecke eingesetzt ist, da so gewährleistet wird, dass jeder einzelne Verstärkungsbereich genau auf der zu seiner Dispersion passenden Wellenlänge arbeitet.

Gemeinsam ist diesen Einreichungen, dass der spektrale Abstand der zu multiplexenden Wellenlängen dadurch definiert wird, dass die Dispersion, also der „Winkel pro Wellenlängenunterschied“, und der durch die Geometrie des Resonators entstehende Winkel, also „Emittergesamtbreite geteilt durch Weg bis zum Dispersionselement“, gleich sein müssen. Das führt bei engem Linienabstand zu sehr großen Aufbauten oder bei gegebener Baugröße und Gitterdispersion zu großen Wellenlängenabstufungen von typischerweise mehr als 1 nm zwischen benachbarten Emitttern. Außerdem ist bekannt, dass viele hochauflösende Gitter nur geringe Beugungseffizienz und/oder spektrale Akzeptanz und/oder geringe Zerstörschwellen besitzen, was den praktischen Aufbau deutlich erschwert. Im folgenden wird gezeigt, dass andere Anordnungen vorteilhafter sind. Diese machen sich die Dispersion, also

Wellenlängenabhängigkeit, doppelbrechender Kristalle zunutze, ähnlich wie sie als Filterelement durch Lyot eingeführt wurden [http://en.wikipedia.org/wiki/Lyot_filter] und die als Doppelbrechungsfilter für Einzellaser eingesetzt werden.

5 Der Einsatz einer dem Lyot-Filter angelehnten Anordnung wurde in DE 101 22 010 A1 vorgeschlagen. In dieser werden die verschiedenen Wellenlängenkanäle des Filters gleichberechtigt behandelt und jeweils mit Licht der passenden Wellenlänge
10 beschickt. Konzeptionell gleichartig, aber zur Aufteilung eines gemeinsamen Strahls in Einzelstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge ist WO 2005/006057 A1 konzipiert. In US 3.503.670 wird die Anordnung dahingehend modifiziert, dass einzelne doppelbrechende Elemente elektrisch manipulierbar sind, so dass einzelne Kanäle auf einen vorbestimmbaren Ausgangskanal
15 aufgeschaltet werden können. Eine Abwandlung dieser Anordnungen wird in B.S.Tan, P.B.Phua, R.F.Wu "Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers using wavelength dependent polarization rotators and polarization beam combiners" (<http://arxiv.org/abs/0710.3635>, eprint arXiv:0710.3635 v1
20 [physics.optics], 2007) beschrieben, die mittels verstellbarer Elemente eine kontinuierlich justierbare Phasenverschiebung der einzelnen Wellenlängen erlaubt. Wird letztgenannte Anordnung hinter einem optisch parametrischen Oszillator (OPO) eingebaut, so kann die Phasenverschiebung von Signal- und
25 Idlerwelle derart justiert werden, dass weitere nichtlineare Prozesse mit bestmöglicher Effizienz erfolgen (DS6). Bei geschickter Anordnung der Elemente in Kombination mit einem oder mehreren Spiegeln ist darüber hinaus eine Reduktion der Baugröße und/oder der Zahl der Elemente erzielbar, wie in
30 US 6 847 786 B2 und US 6 611 342 B2 veröffentlicht. Diesen Veröffentlichungen ist gemeinsam, dass sie dazu dienen, mehrere Lichtquellen auf vorgegebenen optischen Pfaden zu überlagern, falls diese Quellen die richtigen Wellenlängen besitzen. Es wird nicht darauf eingegangen, wodurch die
35 verschiedenen Wellenlängen hergestellt und/oder stabilisiert werden.

Eine Variation eines resonator-internen Lyot-Filters wird in P.B.Phua "Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency" (OPTICS LETTERS, Vol. 31, No. 14, S. 2148-2150, 2006) vorgestellt. Innerhalb des Resonators wird
5 mittels einer Halbwellenplatte und einer Viertelwellenplatte ein einstellbarer Strahlteiler aufgebaut, der das Licht aus den zwei Armen eines Y-förmigen Resonators miteinander mischt. Im Gegensatz zum "konventionellen" Betriebsmodus eines Lyot-Filters wird die Dispersion hier so eingestellt, dass das
10 Licht, welches vom Rückkoppelspiegel kommt, hinter dem Filter variabel elliptisch polarisiert ist, so dass es durch einen Polarisationsstrahlteiler in zwei Anteile zerlegt wird. Diese besitzen beide die selbe Wellenlänge, so dass es sich um die kohärente Kopplung zweier Verstärkungsmedien handelt. Bei
15 Ausfall eines Arms erleidet der gesamte Resonator eine drastische Zunahme der Verluste, so dass er in der Regel ausgehen wird.

Problemstellung und prinzipielle Lösung

Es gilt, Anordnungen zu finden, in denen Laserstrahlen
20 mehrerer unterschiedlicher, möglichst eng gestaffelter Wellenlängen effizient so überlagert werden, dass sie einen gemeinsamen Ausgangsstrahl bilden, also in Strahllage, Strahlausdehnung und Strahldivergenz möglichst exakt übereinstimmen. Dabei sind alle Probleme zu vermeiden, die bei
25 Verwendung von Beugungsgittern auftreten, nämlich mangelnde Leistungsfestigkeit, geringe Effizienz und geringe Dispersion. Die prinzipielle Lösung des Problems besteht darin, dispersive Effekte der Doppelbrechung auszunutzen. Wegen der Wellenlängenabhängigkeit der Doppelbrechung, insbesondere
30 beispielsweise bei Kalzit, ist es möglich, Phasenplatten so zu bauen und einzusetzen, dass sie als Halbwellenplatte für einige Wellenlängen arbeiten und phasenneutral für andere. Dadurch wird die Polarisationsrichtung für die erstgenannten um 90° gedreht und für die letztgenannten nicht verändert.
35 Senkrecht zueinander polarisiert eingekoppelte Strahlen der

entsprechenden Wellenlängen verlassen das Element somit zueinander parallel polarisiert. Dieses Verfahren kann bei geeignet gewählten Kristalldicken mehrfach hintereinander angewandt werden, um mehr als zwei Strahlen zu überlagern.

- 5 Dieses Prinzip kann „passiv“ angewandt werden, indem Strahlen mit geeigneten Wellenlängen eingekoppelt werden, was den im "Stand der Technik" genannten Publikationen entspricht. Wirklich interessant ist das Prinzip aber erst für eine „aktive“ Kopplung, bei der das Koppellement innerhalb eines
- 10 Laserresonators eingesetzt wird, der für die unterschiedlichen aktiven Bereiche zumindest ein gemeinsames Teilstück aufweist und so in mehreren Kanälen die Laseroszillation auf den dort jeweils am besten geeigneten Wellenlängen erzwingt. Dadurch erspart man sich die Notwendigkeit, die zu koppelnden
- 15 Lichtquellen mittels weiterer, vom Kopplungsmechanismus unabhängigen, Rückkopplungs- und Regelschleifen auf die benötigten Wellenlängen zu stabilisieren.
- Im Fall der aktiven Kopplung stellt sich das Filter für jede einzelne Laseroszillation als gewöhnliches doppelbrechendes
- 20 Frequenzfilter, also Lyot-Filter, dar. Die Erfindung besteht darin, das Filter so aufzubauen, dass mehrere Laser gleichzeitig durch ein einziges Filter auf jeweils unterschiedliche Wellenlängen gezwungen werden. Dadurch sind ihre Ausgangsstrahlen räumlich überlagert, obwohl sich die
- 25 Verstärkungsmedien an unterschiedlichen Orten befinden.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

- Eine prinzipielle Darstellung der Funktionsweise der Anordnungen ist in Abbildung 1 im Teilbild (a) dargestellt. Gemäß dieser Abbildung werden zwei Strahlquellen (1) und (3)
- 30 unterschiedlicher Wellenlänge, deren Licht (2) und (4) hier vorzugsweise als senkrecht zueinander polarisiert angenommen ist, mittels eines polarisierenden Strahlteilers (5) zu einem gemeinsamen Strahl (34) überlagert. Dieser Strahl fällt auf einen doppelbrechenden Kristall (6), dessen Doppelbrechung
- 35 wellenlängenabhängig, also dispersiv ist. Die optische Achse

der Doppelbrechung sei hier unter 45° zu den beiden
Polarisationen der Strahlquellen ausgerichtet. Diese
Ausrichtung ist für Verzögerungsplatten vorteilhaft und
üblich, weil dann der dispersiv doppelbrechende Kristall als
5 Wellenplatte fungiert und somit Einfluss auf die Polarisation
der beiden Strahlquellen nimmt. Dank der Dispersion ist es
möglich, eine derartige Dicke auszuwählen, dass der dispersiv
doppelbrechende Kristall für die eine Wellenlänge als
Halbwellenplatte fungiert und für die andere Wellenlänge
10 phasenneutral ist. Konkret muss also die Phasendifferenz des
ordentlichen und des außerordentlichen Lichts für die eine
Wellenlänge $(2n+1)\pi$ und für die andere Wellenlänge $2m\pi$
betragen, m und n sind dabei ganzzahlig. Die
Polarisationsrichtung des Lichts der ersten Wellenlänge wird
15 deshalb um 90° gedreht und die Polarisationsrichtung des
Lichts der zweiten Wellenlänge bleibt unverändert. Somit ist
das Licht hinter dem Element (6) wieder linear polarisiert
(7). Deshalb ließe sich das Licht aus zwei solchen Aufbauten
mittels eines zusätzlichen Polarisationsstrahlteilers erneut
20 überlagern.

Der Anschaulichkeit halber wurde hier mit linear polarisiertem
Licht argumentiert, aber es sind gleichermaßen Anordnungen
möglich, in denen das Licht zumindest streckenweise auch
zirkular oder elliptisch polarisiert ist.

25 In realen Aufbauten ist es vorteilhaft, dass die Wellenlängen
der Strahlquellen nicht à priori festgelegt werden, sondern
sich zweckmäßigerweise durch die geschickte Anordnung der
optischen Bauteile selbst optimal einstellen. Dazu sind dem
Aufbau zwei weitere optische Elemente (8) und (9)
30 hinzuzufügen, wie in der unteren Bildhälfte (b) dargestellt.
Bei Element (9) handelt es sich um ein teilreflektives
Element, beispielsweise einen teildurchlässigen Spiegel.
Element (8) ist ein Polarisationsfilter, das lediglich eine –
hier als vorzugsweise linear angenommene – Polarisation
35 passieren lässt. Der Anteil des Lichts (22), der von Element
(9) reflektiert wird, kann erneut das Polarisationsfilter (8)

passieren und trifft dann auf das dispersiv doppelbrechende Element (6). In Abhängigkeit von der Wellenlänge wird die Polarisationsrichtung bei Transmission durch Element (6) mehr oder weniger stark gedreht, bzw. elliptisch gemacht. Je nach Drehwinkel trennt der Polarisationsstrahlteiler (5) es dann auf und leitet die Anteile (23) und (24) zu den Strahlquellen (1) und (3). Wenn diese Strahlquellen optische Verstärkung zeigen, stellt sich für beide Strahlquellen eine selbstverstärkende Rückkopplungsschleife ein, die dazu führt, dass die Strahlquellen (1) und (3) jeweils auf derjenigen Wellenlänge oszillieren, die die Filteranordnung aus Phasenplatte (6) und Polarisator (5) möglichst verlustarm passieren kann. Für jede einzelne Quelle wirkt diese Filteranordnung also wie ein Lyot-Filter. Aber für die eine Quelle muss das vom Rückkoppelspiegel (9) zurückkehrende und durch das Polarisationsfilter (8) linear polarisierte Licht (22) zusätzlich um 90° gedreht werden und für die andere Quelle nicht, wodurch sich das Licht (23) und das Licht (24) unterscheiden. Das ist nur dadurch möglich, dass sich die Wellenlängen der beiden Quellen derart einstellen, dass Element (6) die jeweils dazu passende Doppelbrechung besitzt. Die Wellenlänge ist somit für die Quellen (1) und (3) unterschiedlich.

In typischen realen Anordnungen werden zu den in Abb. 1 dargestellten Elementen auch noch weitere optische Komponenten wie Linsen, Spiegel, Prismen und dergleichen zur Kollimation, Abbildung, Strahlführung etc. benötigt, die hier der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt sind und die insbesondere für die transversalen Eigenschaften des Lichts (Strahltaillen, Divergenzen, Stabilität, etc.) sorgen. Diese entsprechen dem allgemeinen Stand der Technik. Dennoch soll hier eine etwas ausführlichere Darstellung in Abb. 2 beschrieben werden. In der oberen Bildhälfte (a) sind weitere Kollimationslinsen (10), (12) und (13) für die Laserstrahlen dargestellt, sowie eine zusätzliche Halbwellenplatte (11), die die Polarisation eines der beiden Strahlen um 90° dreht, so

dass keine der beiden Strahlquellen hochkant stehen muss und/oder beide Strahlquellen ansonsten identisch aufgebaut werden dürfen. Dies ist insbesondere bei Verwendung von Halbleiterlasern zweckmäßig, da diese sehr unterschiedliche Divergenzen in zwei orthogonalen Richtungen senkrecht und parallel zu ihrer Epitaxie besitzen. In diesem Fall wird häufig eine kurzbrennweitige Zylinderlinse (10) bzw. (12), „Fast-Axis-Kollimator“ oder kurz FAC genannt, nahe dem Halbleiter platziert. Die Kollimation in der geringer divergenten Richtung kann dann gemeinsam für mehrere Strahlen durch eine weitere Zylinderlinse (13) erzielt werden. In der unteren Bildhälfte (b) ist eine technische Verbesserung angedeutet: indem jeweils mehrere optische Komponenten optisch miteinander verkittet oder kombiniert werden, lässt sich die Zahl der einzelnen Baugruppen deutlich reduzieren. So kann beispielsweise der teilreflektive Spiegel (9) durch eine geeignete Beschichtung (14) der einen Oberfläche des Polarisators (8) ersetzt werden. Detailliertere Darstellungen von kombinierter Nutzung einzelner Elemente werden weiter unten bei den Ausgestaltungsmöglichkeiten näher erläutert.

In Abb. 3 ist dargestellt, wie sich dieses Verfahren kaskadieren lässt, indem mehrstufige Filteranordnungen hintereinander durchlaufen werden. Zu beachten ist dabei, dass das Dickenverhältnis der dispersiven Kristalle (6) und (20) bzw. das Dickenverhältnis zwischen (18) und (20) jeweils ein ganzzahliges Vielfaches (z.B. 1:2, 1:3, 1:5, 3:4, etc.) ist. Dies würde für einen einzelnen Laser unmittelbar aus der Theorie des Lyot-Filters folgen. Streng genommen handelt es sich hierbei physikalisch nicht um das geometrische Dickenverhältnis, sondern um das Verhältnis der optischen Doppelbrechung. Bestehen die zu vergleichenden Kristalle aus dem selben Material, so ist dies proportional zur deren Dicke. Falls unterschiedliche dispersiv doppelbrechende Kristalle eingesetzt werden, sind deren Dicken entsprechend umzurechnen. Analog lassen sich auch weitere Stufen konstruieren, in denen

jeweils die gekoppelten Laser einer niedrigeren Stufe erneut gekoppelt werden, ohne die lineare Polarisation aufzugeben. Dieser Fall entsteht dadurch, dass die hier eingezeichneten Strahlquellen (1), (2), (15) oder (16) ihrerseits durch
5 bereits polarisationsgekoppelte Strahlquellen unter Beachtung der entsprechenden Dickenverhältnisse der dispersiv doppelbrechenden Kristalle ersetzt werden.

Erzielte Vorteile

Gegenüber der herkömmlichen Polarisationskopplung, bei der
10 lediglich zwei Strahlen überlagert werden können, ist es hier möglich, durch aktive Rückkopplung oder voreingestellte Wahl mehrerer Wellenlängen, die auf einem Teilstück des optischen Wegs gekreuzt polarisierten Strahlen wieder parallel auszurichten, also beispielsweise wieder vollständig linear
15 polarisiertes Licht zu erhalten. Danach kann bei Bedarf erneut eine Polarisationskopplung durchgeführt werden und das Verfahren somit in Zweierpotenzen kaskadiert werden. Dadurch werden entsprechend höhere Gesamt-Ausgangsleistungen möglich, ohne dass Einbußen an Strahldurchmesser oder Divergenz nötig
20 werden.

Gegenüber den bekannten Verfahren zum spektralen Multiplexen mittels Gitter oder schmalbandiger dichroitischen Filter ist hier die Kopplungseffizienz wesentlich höher und die
25 spektralen Abstände der Wellenlängen können bei gleichen geometrischen Abmaßen wesentlich geringer sein, wie unten erläutert wird.

Die Leistungsfestigkeit doppelbrechender Kristalle wie z.B.
30 Kalzit ist außerordentlich hoch und übertrifft diejenige von Gittern um viele Größenordnungen.

Es kommt hinzu, dass der Winkel zwischen jeweils zwei zu koppelnden Strahlen wegen ihrer orthogonalen
35 Linearpolarisation sehr groß sein kann. Im Fall eines

handelsüblichen Polarisations-Strahlteilerwürfels beträgt er beispielsweise 90° , so dass sich die unterschiedlichen Verstärkungsbereiche räumlich kaum gegenseitig behindern.

5 Für ein exemplarisches System, das als Kristall einen 1 cm dicken Kalzit einsetzt und bei einer Zentralwellenlänge um 650 nm arbeitet, beträgt der spektrale Unterschied zwischen den Wellenlängen etwa 0,08 nm oder ein ungerades Vielfaches davon. Dabei ist der eigentliche Filter lediglich wenige cm^3
10 groß, trennt die beiden Verstärkungsbereiche aber um mehrere cm. Um mit einem Gitter mit 3000 Linien/mm, also einer Dispersion von etwa 6,7 mrad/nm, eine räumliche Aufspaltung von lediglich 1 cm zweier Spektrallinien im Abstand von ebenfalls 0,08 nm zu erzielen, ist dagegen eine Wegstrecke von
15 über 18 m notwendig.

Wegen der Periodizität des Filters ist diese Anordnung darüber hinaus nicht anfällig gegenüber äußeren Einflüssen, beispielsweise einer Drift der Verstärkungskurve mit der
20 Temperatur. Anstatt die Effizienz der Lasertätigkeit mehr und mehr zu beschneiden, wie es typisch für spektrales Multiplexen mittels Gittern ist, kann die Laserwellenlänge „ausweichen“, also sich an die neuen Gegebenheiten anpassen, indem der Laser auf der benachbarten der periodisch auftretenden Filterlinien
25 arbeitet. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn es sich bei den Strahlquellen selbst bereits um „richtige“ Laser handelt, deren Emissionswellenlänge lediglich durch zusätzliche externe Rückkopplung auf einen bestimmten Wert gezwungen (engl: „locking“) werden soll. Hier sind zwei
30 Aspekte wichtig, erstens die Periodizität, sofern diese zumindest kleiner ist als der Lockingbereich des Lasers, weil dadurch das Filter nicht exakt angepasst werden muss, und zweitens die Tatsache, dass das Multiplexen für sehr eng benachbarte Wellenlängen möglich wird, so dass sich auch bei
35 ziemlich schmalen Verstärkungslinien (z.B. Nd:YAG ca. 0,5 nm) mehrere Laser koppeln lassen.

Weitere Ausgestaltung der Erfindung

Die Erfindung lässt sich für beliebige Lasermaterialien einsetzen. Besonders vorteilhaft ist außer Halbleitern alles, was natürlicherweise oder aufgrund der Pumpbedingungen eine
5 hinreichend breitbandige Verstärkung besitzt.

Wenn die eingesetzten Strahlquellen von sich aus hinreichend genau die benötigten Wellenlängen liefern, die die entsprechenden Lyot-Filter transmittieren, so ist
10 gegebenenfalls das letzte Polarisationsfilter verzichtbar.

Derzeit erscheint es zwar naheliegend, dass es sich bei den Strahlquellen um linear polarisiert emittierende Quellen handelt und dass die doppelbrechenden Kristalle mit ihrer
15 Hauptachse unter 45° gegen die Polarisation geneigt sind. Denn dann dreht eine Halbwellenplatte die lineare Polarisation um 90° , aber es soll in den Ansprüchen ausdrücklich nicht ausgeschlossen werden, dass es auch andere Konfigurationen, z. B. mit zirkular oder elliptisch polarisiertem Licht und/oder
20 anderer Winkelneigung gegenüber der Lichtpolarisation gibt, die in bestimmten Situationen ebenfalls zweckmäßig sind. Zumindest auf Teilstrecken des optischen Systems, beispielsweise innerhalb des dispersiv doppelbrechenden Kristalls, treten in jedem Fall elliptische Polarisationen
25 auf, so dass diese Eigenschaften in der Erfindung immanent enthalten sind und hier nicht weiter ausgeführt werden, weil sie durch die üblichen Kenntnissen eines Fachmanns erarbeitet werden können.

30 Die Ein- und Austrittsflächen der optischen Elemente werden vorteilhaft mit Antireflex-Beschichtungen versehen, um zusätzliche „parasitäre“ Laserresonatoren zu verhindern. Im Falle der passiven Wellenlängenkopplung von Diodenlasern gilt das insbesondere für die Auskoppelfacetten des Halbleiterchips.
35 Bei hinreichend dichter Wellenlängen-Staffelung kann dies

gegebenenfalls verzichtbar sein, falls die zusätzliche Rückkopplung ausreicht, den Diodenlaser zu „locken“, also auf die für „sein“ Lyot-Filter gültige Wellenlänge zu zwingen.

- 5 Eine sehr kompakte Ausführung ist in Abb. 4 in mehreren Varianten (a) bis (c) dargestellt. In diesen ist als Polarisationsstrahlteiler mindestens ein sogenannter „Displacer“ eingesetzt. Dabei handelt es sich ebenfalls um einen doppelbrechenden Kristall, meist Kalzit, der so
- 10 geschnitten ist, dass die Ausbreitungsrichtungen von „ordentlichem“ (25) und „außerordentlichem“ (26) Licht einen Winkel bilden. Dadurch lassen sich die beiden Polarisierungen voneinander trennen oder zusammenfügen. Eine Drehung der Polarisation findet hierbei nicht statt. In Bildteil (a)
- 15 werden zwei Strahlquellen (1) und (3), die hier als bereits kollimiert angenommen sind, parallel zueinander ausgerichtet. Deren Licht (2) und (4) dringt in den Polarisationsstrahlteiler (30) ein, wobei gegebenenfalls das eine noch mittels einer Halbwellenplatte (11) so in seiner
- 20 Polarisation gedreht wird, dass es bezüglich des Kristalls das außerordentliche Licht (26) darstellt, falls die Strahlquelle nicht sowieso diese Polarisation emittiert. Am Vereinigungspunkt (27) von ordentlichem (25) und außerordentlichem (26) Licht endet der Displacer-Kristall und
- 25 der dispersiv doppelbrechende Kristall (6) schließt sich an. Bei Bedarf kann ein zusätzlicher Polarisationsfilter (8) mit geeignet reflektiver Oberfläche (14) für Rückkopplung sorgen, so dass sich die passenden Wellenlängen selbständig einstellen.
- 30 In Bildteil (b) ist dargestellt, wie sich die Anordnung auf vier Strahlquellen (28) erweitern lässt. In Ergänzung zur Variante aus Bildteil (a) benötigt man zwei Displacer (30) und zwei dispersiv doppelbrechende Kristalle (6), deren Längen aufeinander und auf die transversalen Abstände der
- 35 Strahlquellen (28) abgestimmt sind. Diese Anordnung ist

besonders vorteilhaft, wenn es sich bei den Strahlquellen um die Emitter eines Halbleiterlaser-Barrens handelt.

Bildteil (c) beschreibt eine Variante, die einen regulären Polarisationsstrahlteiler (5) und einen Displacer (30)

5 kombiniert, um ebenfalls vier Strahlquellen (28) zu vereinigen.

Weitere Kombinationsmöglichkeiten aus unterschiedlichen Polarisationsstrahlteilern, z.B. Wollaston-Prismen, Taylor-

10 Prismen oder dergleichen, sind einfach zu konstruieren, ebenso wie höhere Stufen zur Kombination von mehr als vier Strahlquellen. So kann es beispielsweise zweckmäßig sein, bei mehrstufiger Kombination von Strahlquellen mittels mehrerer Displacer, die Strahlquellen in einem zweidimensionalen Raster
15 anzuordnen und einige Displacer um 90° um die Ausbreitungsrichtung zu drehen (Abb. 6c).

Wenn die Strahlquellen weitgehend kollimiert sind, also

etliche optische Komponenten durchlaufen werden können, ohne

20 eine zusätzliche Kollimation zu benötigen, gibt es eine Reihe weiterer vorteilhafter Anordnungen gemäß Abb. 5. Bei diesen werden die optischen Komponenten vorzugsweise an ihren planen Flächen miteinander verkittet. In einigen Fällen, z.B.

Bildteile (b) und (c) ist mittels Umlenkprismen (31) sogar ein

25 Mehrfachdurchgang durch einzelne Komponenten realisierbar, so dass sich die Anzahl der Komponenten verringert und somit gegebenenfalls auch die Baugröße und die Kosten.

Eine Erweiterung auf weitere Strahlen, gegebenenfalls unter

30 Nutzung mehrerer Schichten von Strahlen ist von fachkundigem Personal leicht durchzuführen. Ansatzweise ist dieses in

Abb. 6 in zwei pseudo-stereoskopischen Darstellungen

skizziert. Bildteil (a) stellt den grundsätzlichen

Koppelmechanismus gemäß des Standes der Technik dar. In

35 Bildteil (b) werden zwei rückkopplungs-sensitive Strahlquellen polarisationserhaltend aktiv gekoppelt, indem eine Kombination

aus zwei Polarisationsstrahlteilern und einem eingebetteten dispersiv doppelbrechenden Kristall eingesetzt wird. In Bildteil (c) wird dieser Aufbau um zwei gekreuzte Displacer und zwei weitere dispersiv doppelbrechende Kristalle
5 erweitert, um insgesamt acht Strahlquellen, vorzugsweise Laser, polarisationserhaltend zu überlagern.

Eine interessante Anwendung dieser spektral kombinierten Strahlquellen ergibt sich dadurch, dass zwei Strahlquellen mit
10 engem spektralem Abstand im Ausgangsstrahl zu einer hochfrequenten Schwebung führen, deren Frequenz durch den Spektralabstand gegeben ist. Wenn dieses Licht zur Frequenzverdopplung mittels nichtlinearer Kristalle benutzt wird, sollte sich die Intensität der resultierenden zweiten
15 Harmonischen gegenüber einem Einzellaser mehr als verdoppeln. Da die Effizienz der Frequenzverdopplung proportional zum Quadrat der eingestrahnten Intensität verläuft, sollten nämlich die positiven Effekte während der konstruktiven Interferenz die negativen während der destruktiven Interferenz
20 überkompensieren. Wenn diese mehreren Wellenlängen eine starre Phasenbeziehung besitzen, z.B. durch nichtlineare Prozesse wie sättigbare Absorber oder nichtlineare Brechungsindices oder eine Modulation der Pumpenergie, so entstehen Schwebungen zwischen den unterschiedlichen Emissionen, die zu kurzen
25 Pulsen führen.

Eine weitere interessante Anwendung könnte daraus resultieren, dass sich mit dieser Methode mehrere schmalbandige Laser verlustarm sehr eng nebeneinander staffeln lassen. Wenn diese
30 Linien dann abwechselnd für Spektralmessungen (z.B. Absorption) genutzt werden, lassen sich Flanken und eng nebeneinander liegende Linien präzise vermessen, ohne dass eine kontinuierliche Durchstimmung nötig wäre.

35 Als dispersiv doppelbrechender Kristall eignen sich verschiedene Materialien (Kalzit, BBO, LiNbO, Quarz, etc.).

- Entscheidend ist dabei weniger der absolute Brechungsindexunterschied der Doppelbrechung, sondern vielmehr eine möglichst hohe Änderung dieses Unterschieds mit der Wellenlänge. In diesem Sinne ist der Kristall gewissermaßen das genaue Gegenteil einer Halbwellenplatte nullter Ordnung (engl: „Zero-order-waveplate“). Er sollte möglichst viele Wellenlängen Gangunterschied aufweisen und dieser Unterschied sollte sich spektral auch noch möglichst stark ändern.
- Das Verfahren ist nicht nur für Halbleiterlaser vorteilhaft, sondern auch für das spektrale Multiplexen von Festkörperlaser geeignet (siehe Abb. 7), da die enge spektrale Staffelung auch bei schmalen Verstärkungslinienbreiten, insbesondere Nd:YAG, einsetzbar ist, so dass sich auch hier die Gesamtleistung steigern lässt, während die Pumpleistung im einzelnen Verstärkungsbereich handhabbar bleibt.

Kurzbeschreibung der Abbildungen

Bezeichnungen in Abbildungen:

- (1) erste Strahlquelle
- (2) Licht der ersten Strahlquelle
- (3) zweite Strahlquelle
- (4) Licht der zweiten Strahlquelle
- (5) Polarisationsstrahlteiler
- (6) dispersiv doppelbrechendes Element
- (7) polarisierter gemeinsamer Ausgangsstrahl der ersten und zweiten Strahlquelle
- (8) Polarisationsfilter
- (9) teildurchlässiges reflektives Element
- (10) Kollimationslinse für erste Strahlquelle
- (11) polarisationsdrehendes Element
- (12) Kollimationslinse für zweite Strahlquelle
- (13) Kollimationslinse für beide Strahlquellen
- (14) teilreflektive Beschichtung

- (15) dritte Strahlquelle
- (16) vierte Strahlquelle
- (17) Polarisationsstrahlteiler
- (18) dispersiv doppelbrechendes Element
- 5 (19) Polarisationsstrahlteiler
- (20) dispersiv doppelbrechendes Element
- (21) Polarisationsfilter wie (8)
- (22) Vom teilreflektiven Element zu den Strahlquellen
zurücklaufendes Licht
- 10 (23) zur Strahlquelle (1) zurücklaufendes Licht
- (24) zur Strahlquelle (3) zurücklaufendes Licht
- (25) ordentlicher Lichtstrahl in einem doppelbrechenden
Kristall
- (26) außerordentlicher Lichtstrahl in einem doppelbrechenden
15 Kristall
- (27) gemeinsamer Ort von ordentlichem und außerordentlichem
Licht
- (28) mehrere gegebenenfalls kollimierte Strahlquellen
- (29) mehrere Strahlen
- 20 (30) doppelbrechender Kristall als Polarisations-Strahlteiler
(„displacer“) als Spezialfall von (5)
- (31) Umlenkprisma
- (32) Wollaston-Prisma als Polarisations-Strahlteiler als
Spezialfall von (5)
- 25 (33) Spiegel
- (34) überlagerter Strahl

Abbildung 1:

Eine prinzipielle Darstellung der Funktionsweise der Anordnungen.

- 30 Zwei Strahlquellen (1) und (3), deren Licht (2) und (4) hier
als senkrecht zueinander polarisiert angenommen ist, werden
mittels eines polarisierenden Strahlteilers (5) zu einem
gemeinsamen Strahl (34) überlagert und mit einem geeignet
ausgewählten dispersiv doppelbrechenden Kristall (6) wieder
35 linear polarisiert (7). Eine aktive Rückkopplung und dadurch

selbständige Einstellung geeigneter Wellenlängen wird durch die Elemente (8) und (9) dadurch erzielt, dass ein Teil (22) des gemeinsamen Lichts Teilstrahlen (23) und (24) in die Strahlquellen zurück geleitet wird.

5 **Abbildung 2:**

Eine realitätsnähere Darstellung der Anordnungen.

In der oberen Bildhälfte sind typischerweise benötigte Kollimationslinsen (10), (12) und (13) dargestellt, sowie eine zusätzliche Halbwellenplatte (11), die die Polarisation eines
10 der beiden Strahlen um 90° dreht.

In der unteren Bildhälfte ist angedeutet, dass jeweils mehrere optische Komponenten optisch miteinander verkittet werden können.

Abbildung 3:

15 Mehrstufige Anordnung.

Es ist dargestellt, wie sich dieses Verfahren kaskadieren lässt, indem mehrstufige Filteranordnungen hintereinander durchlaufen werden, indem weitere dispersive Kristalle (18) und (20), sowie ein Polarisationsfilter (21) hinzugefügt
20 werden. Damit werden analog zu Elementen (1), (3), (5), (6) die Strahlquellen (15) und (16) mittels des Polarisationsstrahlteilers (17) und des doppelbrechend dispersiven Element (18) in einem ersten Schritt gekoppelt. Danach werden die beiden Strahlen mittels Element (19)
25 überlagert und mittels Rückkopplung an Element (9) durch Elemente (20) und (21) auf die jeweilige Emissionswellenlänge gezwungen. Generell kann jede Strahlquelle selbst wiederum aus einer gekoppelten Strahlquelle bestehen, solange die Dispersionen der doppelbrechenden Elemente darauf abgestellt
30 sind.

Abbildung 4:

Anordnungen, in denen mindestens ein Polarisations-Strahlteiler (30) als Spezialfall eines Teilers (5) aus einem

sogenannten „Displacer“, also einem doppelbrechenden Kristall besteht, in dem sich der ordentliche (25) und der außerordentliche Strahl (26) in unterschiedlichen Richtungen ausbreiten. Hiermit lassen sich besonders kompakte Aufbauten realisieren, die auch aus mehreren Stufen bestehen können. Wenn mehrere Displacer mit ihren optischen Achsen gegeneinander, nicht notwendig um 90° , gedreht sind, lassen sich auch zweidimensionale Anordnungen mehrerer Strahlquellen zu einem gemeinsamen Strahl zusammenfügen.

10 **Abbildung 5:**

Anordnungen, in denen mehrere Strahlteiler (5), (8) und/oder dispersiv doppelbrechende Kristalle (6) und/oder weitere optische Elemente (31) miteinander verkittet sind. Dadurch lassen sich besonders kompakte Aufbauten realisieren. Eine weitere Reduktion von Volumen und Kosten entsteht, wenn einige optische Komponenten (5), (6), (8) mehrfach durchlaufen werden, wie in Bildteilen (b) und (c) dargestellt.

Abbildung 6:

Pseudo-Stereometrische Darstellungen.

- 20 Bildteil (a) zeigt, wie sich zwei vorzugsweise kollimierte Strahlquellen (1) und (2) geeigneter Polarisation und Wellenlänge mittels eines Polarisationsstrahlteilers (5) und einem dispersiv doppelbrechenden Kristall (6) zu einem gemeinsamen polarisierten Strahl (7) vereinigen lassen.
- 25 Bildteil (b) zeigt, wie sich die Wellenlängen selbständig korrekt einstellen, wenn die Strahlquellen rückkopplungs-sensitiv sind und man einen weiteren Polarisationsfilter (8) hinzufügt und wenn Fläche (14) geeignet teilreflektiv ausgeführt ist.
- 30 Bildteil (c) stellt eine mögliche polarisationserhaltende Kopplung von acht Strahlquellen (28) zu einem gemeinsamen Strahl (7) dar. Dabei wird mit Polarisationsstrahlteilern (5) und (8) sowie zwei um 90° gegeneinander gedrehten Displacern (30) gearbeitet. Hier werden insgesamt drei aufeinander

abgestimmte dispersiv doppelbrechende Kristalle (6) benötigt. Wenn Fläche (14) geeignet teilreflektiv ist, können sich die Wellenlängen selbständig geeignet einstellen.

Abbildung 7:

- 5 Einsatz von Wollaston-Prismen.
Abbildung (7) zeigt, wie mit Hilfe eines Wollaston-Prismas (32) zwei Laser spektral gekoppelt werden können. Dies ist insbesondere für Festkörperlaser, also beispielsweise Nd:YAG-Laser eine gute Wahl. Dazu ist in der Regel ein zusätzlicher
- 10 rückseitiger hochreflektiver Spiegel (33) als Abschluss des jeweiligen Resonators notwendig. Wenn der verwendete Laserkristall keine Vorzugsrichtung seiner Polarisation besitzt, kann auf den Einsatz von Halbwellenplatten (11) verzichtet werden. Bei geschickter Auslegung der
- 15 Laserresonatoren kann die Linse (13) für beide Resonatoren gemeinsam genutzt werden oder im Falle einer thermischen Linse im aktiven Material auch ganz verzichtbar sein.

Ansprüche

1. Optische Anordnung, bestehend aus:

(a) mindestens zwei Verstärkungsmedien, von denen mindestens

5 zwei teilweise überlappende Verstärkungsbereiche besitzen,

(b) mindestens einem Polarisationsstrahlteiler und

(c) mindestens einem dispersiv doppelbrechenden Element (6),

wobei

(d) der mindestens eine Polarisationsstrahlteiler (5) das

10 Licht der Verstärkungsmedien (1, 3) überlagert und

gemeinsam in Richtung des mindestens einen dispersiv

doppelbrechenden Elements (6) lenkt und

(e) das mindestens eine dispersiv doppelbrechende Element

(6) für mindestens zwei der oben genannten verschiedenen

15 Wellenlängen (a) eine unterschiedliche Phasenverschiebung

durchführt,

dadurch gekennzeichnet, dass

(f) das Licht von dem mindestens einen dispersiv

doppelbrechenden Element (6) auf einen mindestens

20 teilreflektiven Spiegel (9) trifft, der so aufgestellt ist,

dass mindestens ein Teil des reflektierten Lichts wieder

zurück in das jeweilige Verstärkungsmedium (1, 3) läuft.

2. Optische Anordnung gemäß Anspruch 1, gekennzeichnet

25 dadurch, dass

das Licht von dem mindestens einen dispersiv doppelbrechenden

Element (6) durch ein weiteres Polarisationsfilter (8) auf den

mindestens teilreflektiven Spiegel (9) trifft.

30 3. Optische Anordnung gemäß Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet

dadurch, dass

(a) mindestens eines der genannten dispersiv

doppelbrechenden Elemente für mindestens zwei verschiedene

Wellenlängen als unterschiedlicher Phasenschieber arbeitet

35 und

(b) sich die Summe der relativen Phasenverschiebungen zwischen den beiden Wellenlängen entlang ihres gemeinsamen Wegs um etwa $\lambda/2$ unterscheidet.

- 5 4. Optische Anordnung gemäß Anspruch 3, gekennzeichnet dadurch, dass
- (a) die Verstärkungsmedien linear polarisiertes Licht emittieren und
 - (b) die optische Achse des dispersiv doppelbrechenden
- 10 Kristalls unter 45° gegen die Richtung der Linearpolarisation geneigt ist.

5. Optische Anordnung gemäß einem der vorigen Ansprüche, gekennzeichnet dadurch, dass mindestens eine der Strahlquellen
- 15 selbst gemäß den vorigen Ansprüchen aufgebaut ist.

6. Optische Anordnung gemäß Anspruch 5, gekennzeichnet dadurch, dass die Dickenverhältnisse der dispersiv doppelbrechenden Elemente, die von einzelnen Strahlen
- 20 nacheinander durchlaufen werden, ungefähr ganzzahlige Vielfache darstellen.

7. Optische Anordnung gemäß einem der vorigen Ansprüche, gekennzeichnet dadurch, dass Umlenkspiegel und/oder
- 25 Umlenkprismen die Strahlen so leiten, dass mindestens ein Polarisationsstrahlteiler oder ein dispersiv doppelbrechendes Element von mindestens einem Strahl auf dem Weg vom Verstärkungsmedium zum teilreflektierenden Spiegel mehrfach an unterschiedlichen Stellen durchlaufen wird.

- 30 8. Optische Anordnung gemäß Anspruch 6 oder 7, gekennzeichnet dadurch, dass der Mehrfachdurchgang mindestens eines Strahls vom Verstärkungsmedium zum teilreflektiven Element durch das dispersiv doppelbrechende Element die Bedingung ganzzahliger
- 35 Vielfacher der Dicken zueinander gewährleistet.

9. Optische Anordnung gemäß einem der vorigen Ansprüche, gekennzeichnet dadurch, dass der gemeinsame Strahl zusätzlich durch ein nichtlineares optisches Element läuft.

5 10. Optische Anordnung gemäß Anspruch 9, gekennzeichnet dadurch, dass sich das nichtlineare optische Element innerhalb des Resonators befindet.

10 11. Optische Anordnung gemäß einem der vorigen Ansprüche, gekennzeichnet dadurch, dass der gemeinsame Strahl zur Spektroskopie in einem engen Spektralbereich eingesetzt wird.

15 12. Optische Anordnung gemäß Anspruch 9 oder 10, gekennzeichnet dadurch, dass das nichtlineare Element eine feste Phasenbeziehung zwischen den unterschiedlichen Wellenlängen begünstigt oder erzwingt.

20 13. Optische Anordnung gemäß Anspruch 12, gekennzeichnet dadurch, dass die Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge mindestens zeitweise eine feste Phasenbeziehung besitzen, so dass hochfrequente Schwebungen oder kurze Pulse entstehen.

Zusammenfassung:

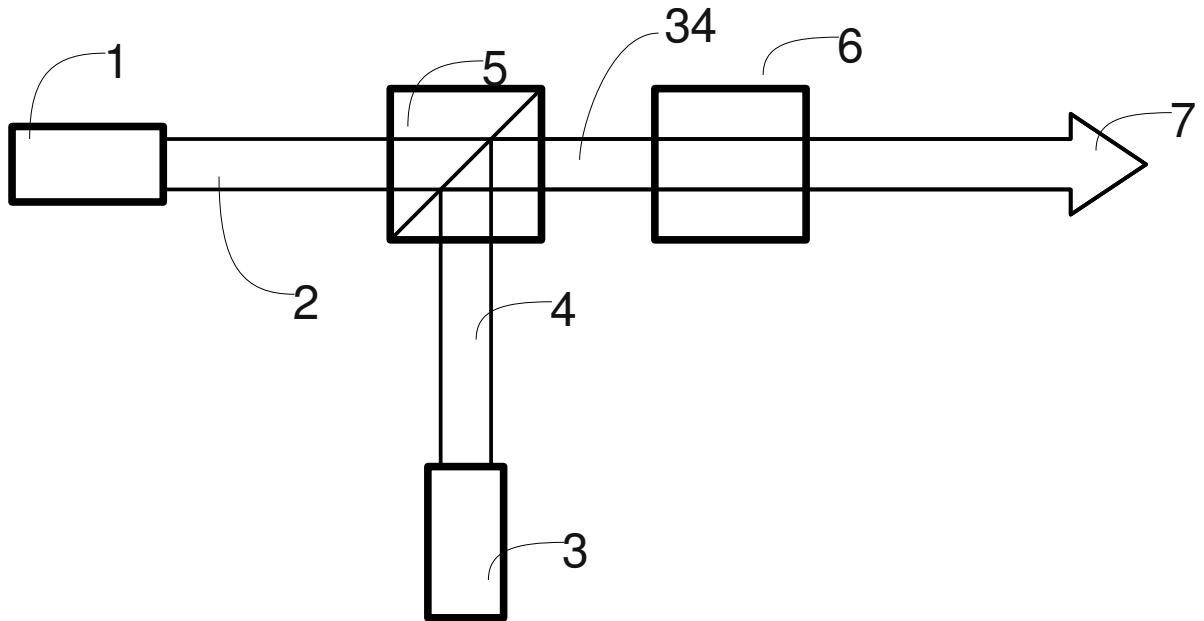
Bei der Erfindung handelt es sich um eine Anordnung (a), mit der zwei polarisierte Strahlquellen (1) und (2) unterschiedlicher Wellenlänge mittels polarisierender
5 Strahlteiler (5) räumlich überlagert werden. Dank eines dispersiv doppelbrechenden Kristalls (6) werden beide Strahlen wieder parallel polarisiert.

Wenn, wie in (b) angenommen, die Strahlquellen bezüglich ihrer spektralen Emission auf Rückkopplung reagieren, können ein
10 zusätzlicher Polarisationsfilter (8) und eine teilreflektive Beschichtung (9) dafür sorgen, dass sich passende Wellenlängen selbständig einstellen.

Dieses Verfahren ist skalierbar, wie in (b) dargestellt. Hier werden mit Hilfe weiterer dispersiv doppelbrechender Kristalle
15 (6) und doppelbrechender Kristalle, die polarisationsabhängig einen Strahlversatz erzeugen, insgesamt 8 Strahlquellen zu einem einzelnen polarisierten Strahl zusammengefügt.

20 Abbildung für Zusammenfassung: Abb.8

Abbildung 1:
(a)



(b)

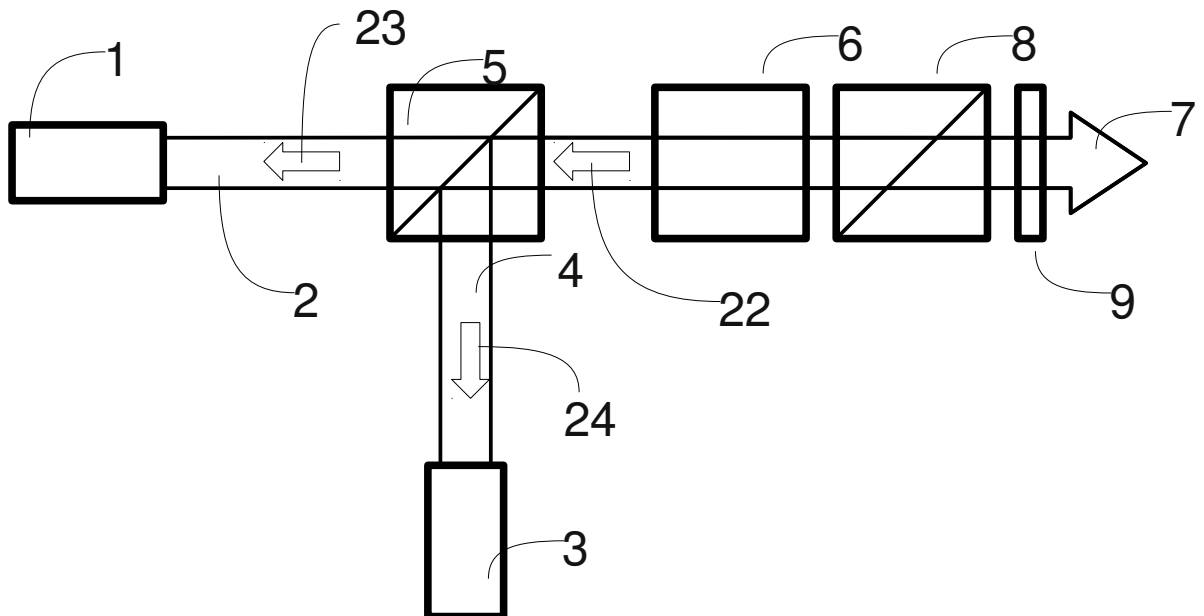
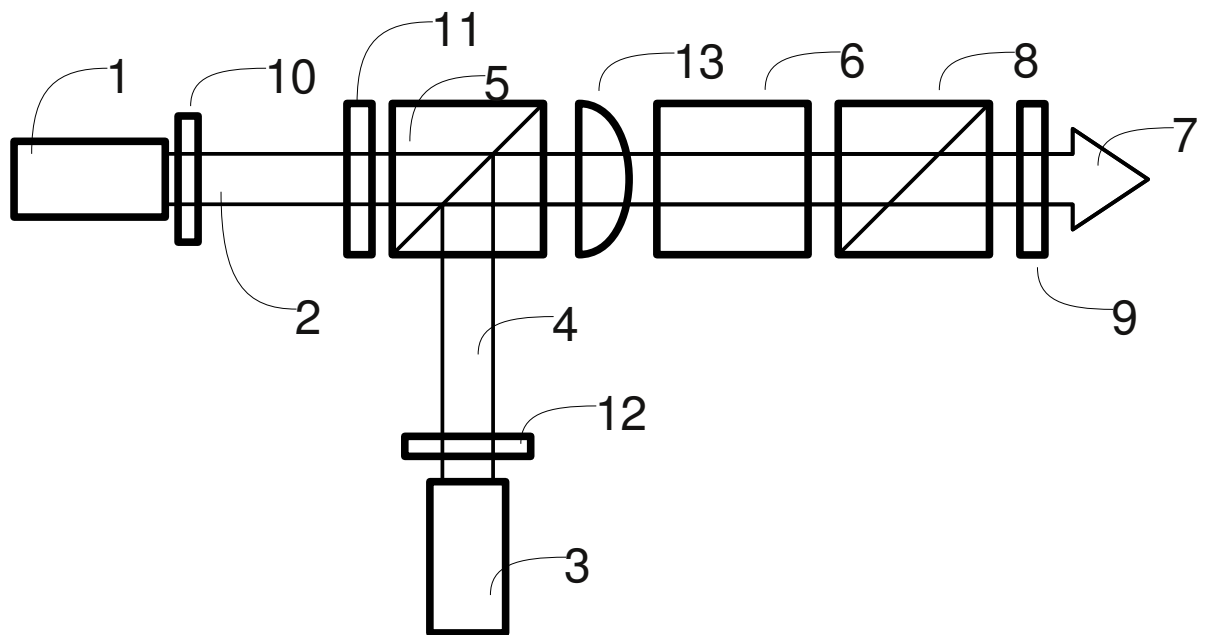


Abbildung 2:

(a)



(b)

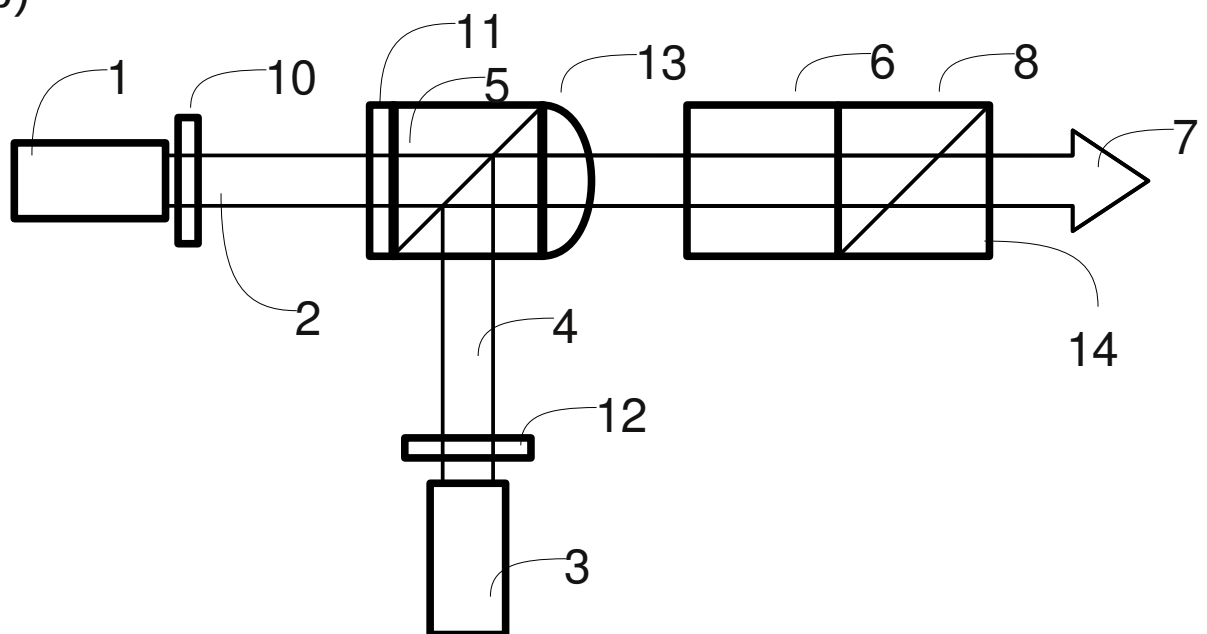


Abbildung 3:

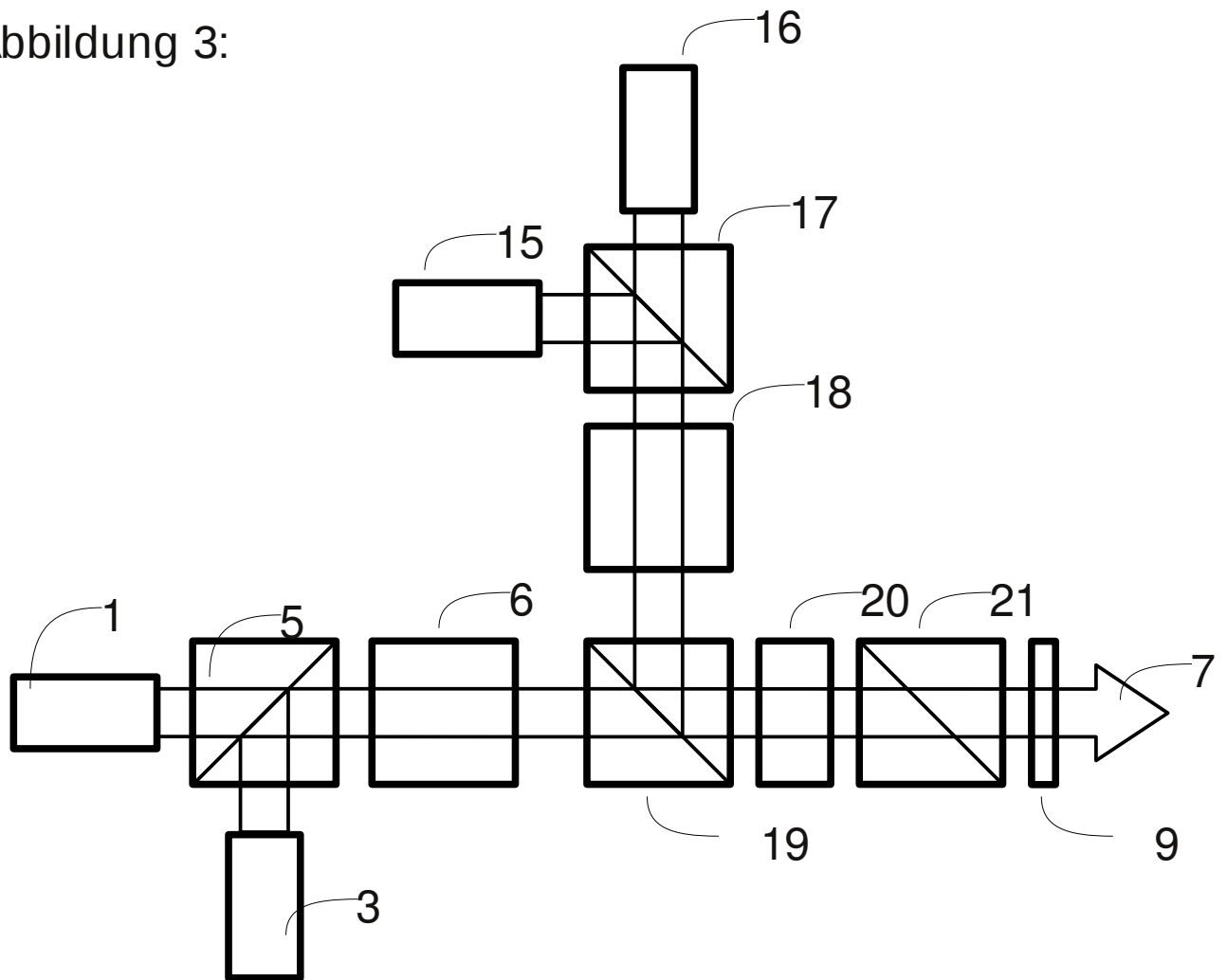
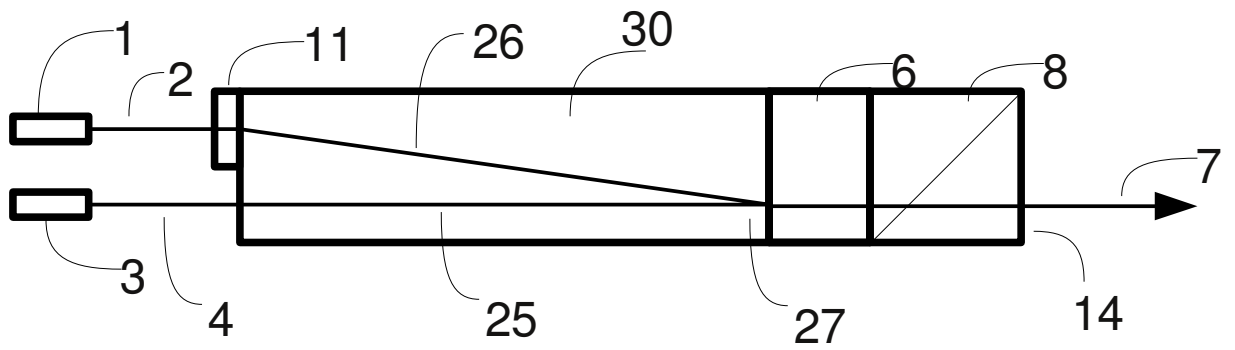
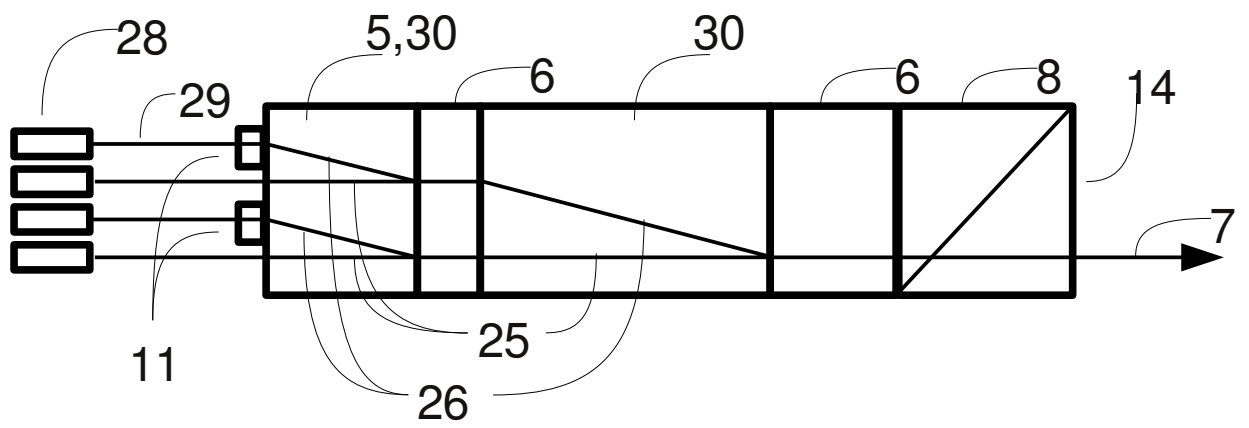


Abbildung 4:

(a)



(b)



(c)

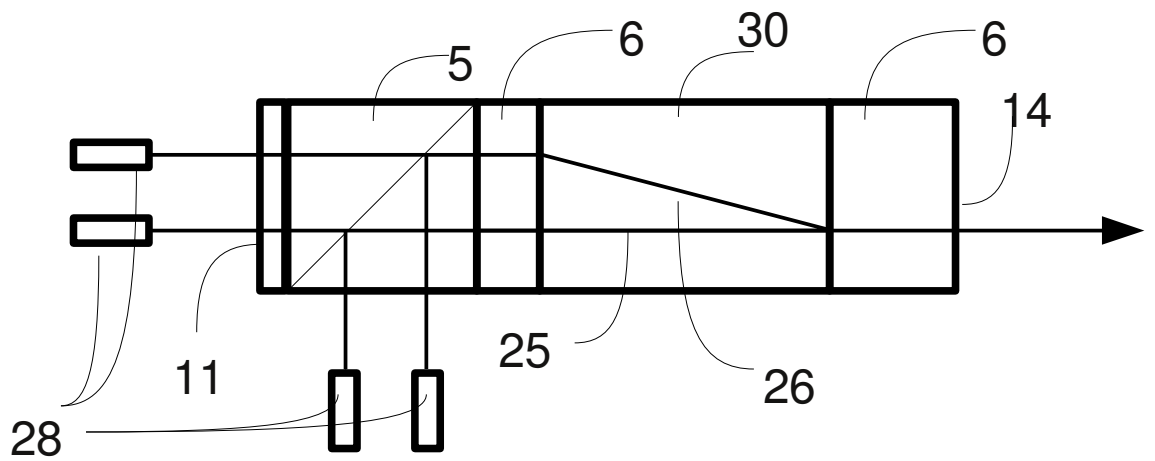


Abbildung 5:

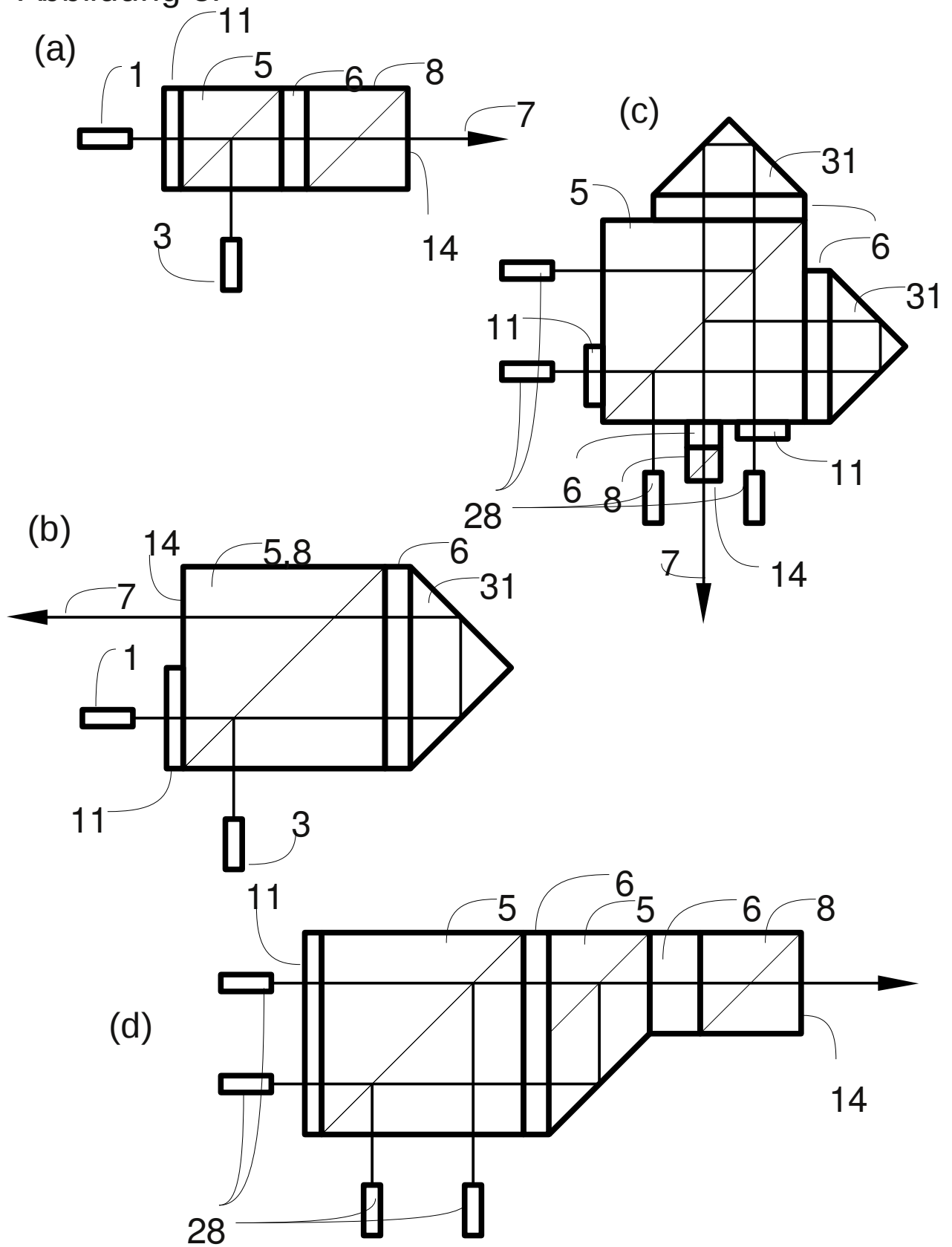


Abbildung 6:

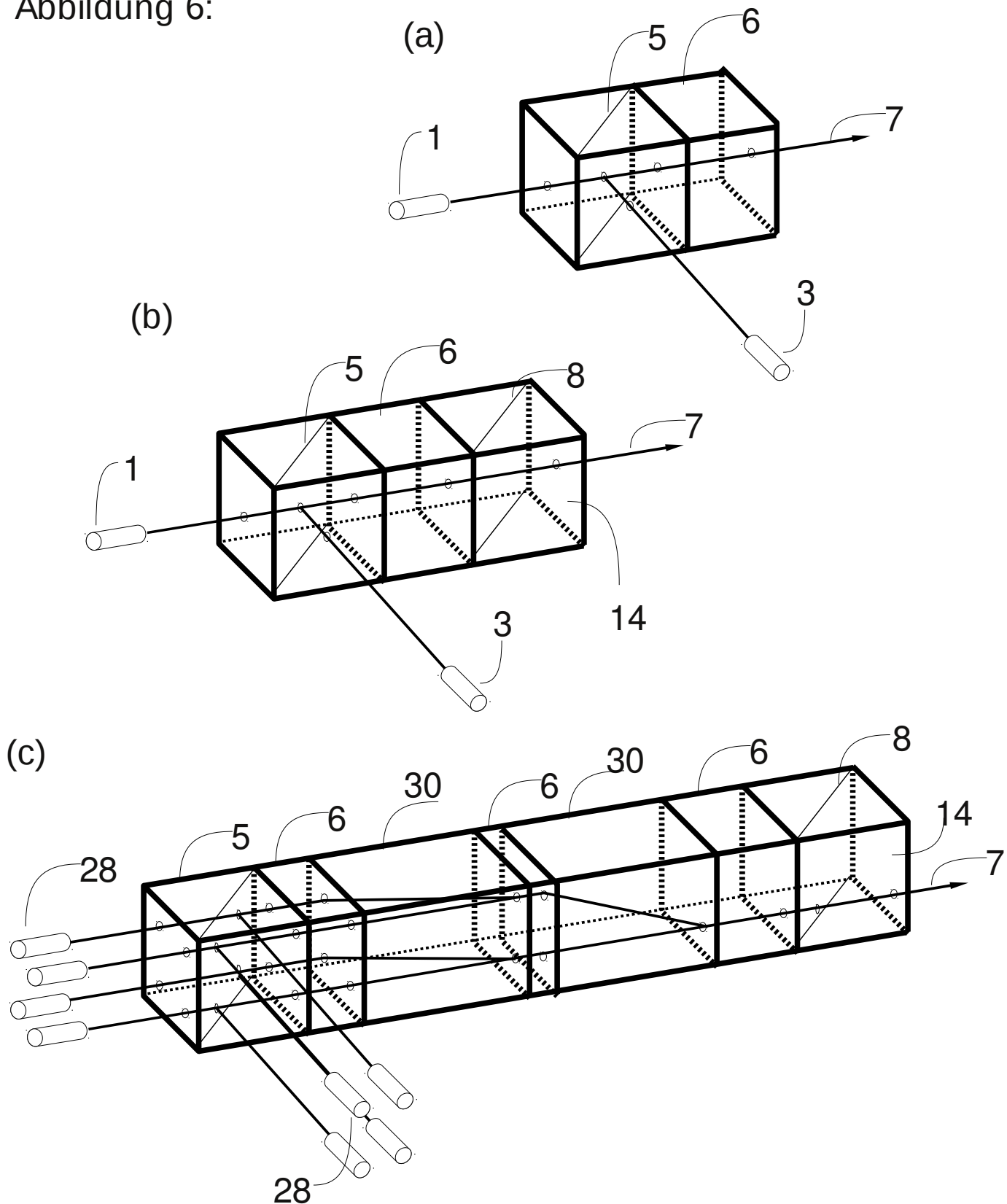


Abbildung 7:

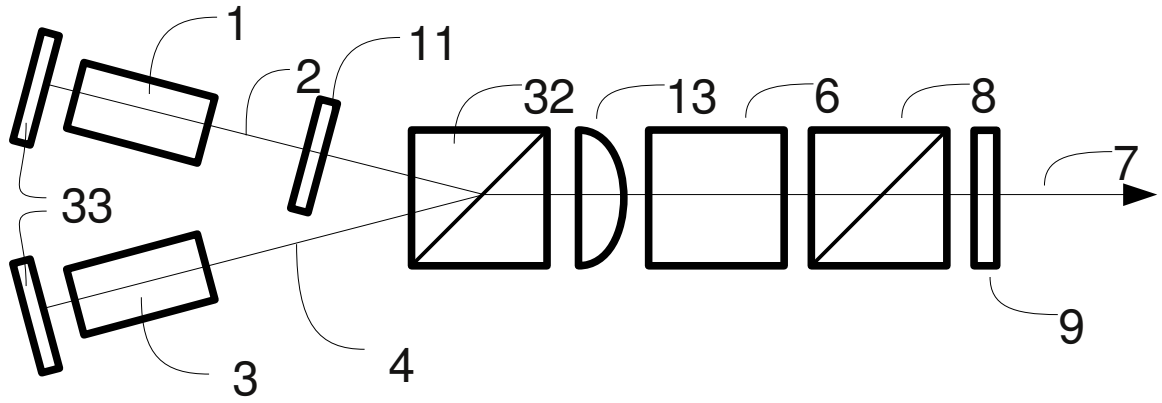


Abbildung 8:

