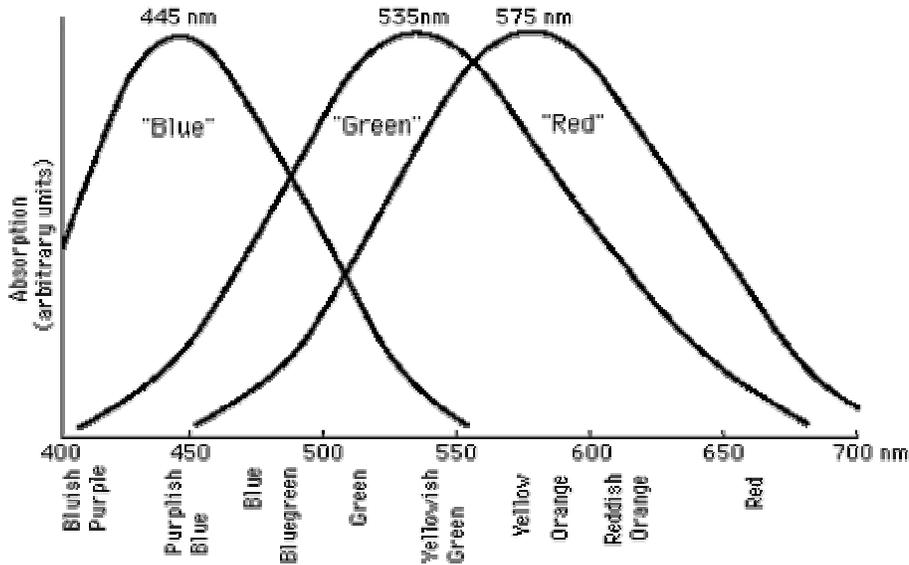


Farbmetrik und IBK-Farbdiagramm

Die Farbwahrnehmung basiert auf der komplexen Verarbeitung von Nervenimpulsen dreier verschiedener Arten von Rezeptoren auf der Retina, den so genannten Zapfen, die jeweils auf unterschiedliche Wellenlängen sensibilisiert sind. Die folgende Abbildung zeigt die ungefähren Empfindlichkeitsverläufe der drei Typen von Zapfen in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Man sieht, dass sich die Empfindlichkeitskurven überlappen.

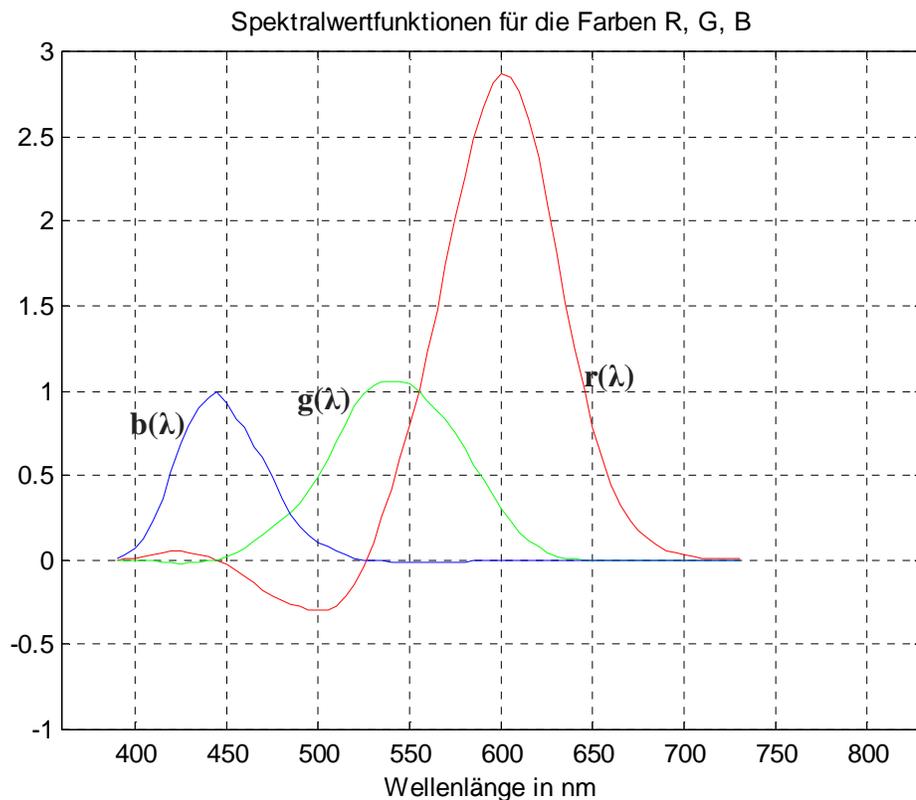


Aufgrund der Tatsache, dass der resultierende Farbeindruck aus den Informationen dreier verschiedener Rezeptoren 'errechnet' wird, besteht kein eindeutiger Zusammenhang, der von einer wahrgenommenen Farbe auf das von einer Lichtquelle abgestrahlte messbare Leistungsdichtespektrum $P[\lambda]$ schließen lässt. In umgekehrter Richtung, d.h. vom Leistungsdichtespektrum hin zur wahrgenommenen Farbe lässt sich dieser Zusammenhang jedoch herstellen. Bereits in den Zwanzigerjahren des letzten Jahrhunderts wurden daher Anstrengungen unternommen, mit einer Reihe von Wahrnehmungsexperimenten Farbe in einem dreidimensionalen Bezugssystem zu normieren.

Resultat war der 2-Grad-Normalbeobachter der Internationalen Beleuchtungskommission (IBK). Mit '2-Grad' ist hier der gewählte Betrachtungswinkel gemeint. Zunächst wurden als 'Primärvalenzen' (Grundfarben) Rot, Grün und Blau verwendet. Im resultierenden Bezugssystem wird eine Farbe F somit als Vektor mit den Komponenten R , G und B dargestellt, die die jeweiligen Anteile der Primärvalenzen bezeichnen:

$$\vec{F} = R \cdot \vec{r} + G \cdot \vec{g} + B \cdot \vec{b}$$

Zur Bestimmung der erforderlichen Farbanteile mussten einige tausend Testpersonen durch geeignete Mischung aus Rot, Grün und Blau Farbtöne monochromatischen Lichts aus dem sichtbaren Sonnenspektrum nachbilden, d.h. 'einfarbiges' Licht mit einem schmalen Wellenlängenbereich. Aus den jeweiligen Anteilen der drei Primärvalenzen, die zur Ermischung einer Spektralfarbe mit einer bestimmten Wellenlänge erforderlich waren, konnten die so genannten 'Spektralwertfunktionen' $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ errechnet werden. Diese sind in der folgenden Abbildung dargestellt.



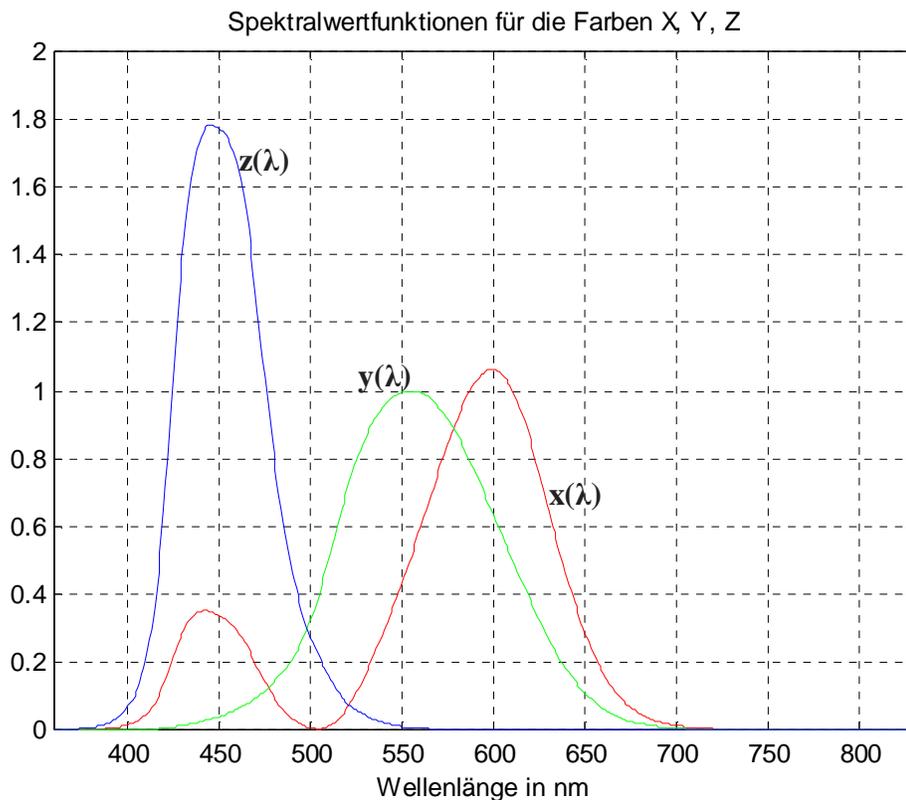
Man kann z.B. sehen, dass sich die Farben im Wellenlängenbereich zwischen 525 und 630 nm durch Rot und Grün mit jeweils unterschiedlichen Anteilen ermischen lassen.

Es wurde allerdings auch festgestellt, dass zur Ermischung der Farben im Bereich zwischen 445 bis 525 nm theoretisch die Farbe Rot von den Farben Blau und Grün abgezogen werden müsste. Da eine Lichtquelle jedoch entweder nur ein- oder ausgeschaltet werden kann, wurde damit gezeigt, dass das Bezugssystem RGB zur Darstellung der Spektralfarben nur eingeschränkt geeignet ist. Der Grund dafür, dass es trotzdem heutzutage im Bild- und Videobereich zur Anwendung kommt, liegt unter anderem an seiner relativ einfachen technischen Umsetzung und dem für praktische Anwendungen meist ausreichenden Farbraum.

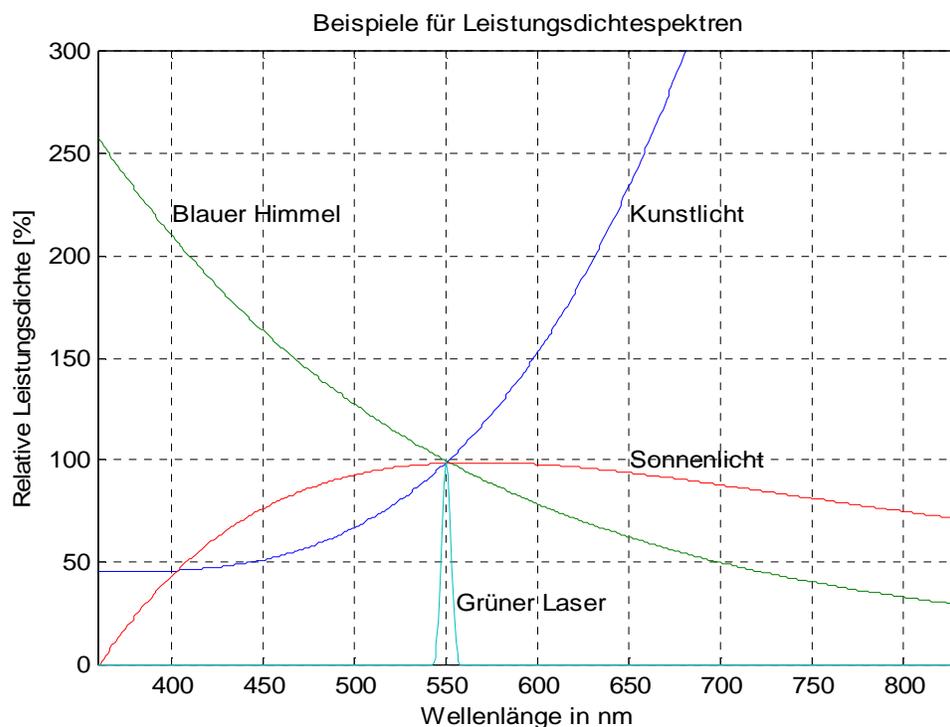
Die Unzulänglichkeiten des RGB-Systems wurden von der IBK durch Definition eines modifizierten Farbsystems behoben, das auf den fiktiven Farben X, Y und Z beruht. Diese Farben, bzw. die dazugehörigen Spektralwertkurven $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$ werden durch gewichtete Addition der Spektralwertfunktionen für Rot, Grün und Blau gebildet:

$$\begin{aligned} x(\lambda) &= 0.49 \cdot r(\lambda) + 0.31 \cdot g(\lambda) + 0.20 \cdot b(\lambda) \\ y(\lambda) &= 0.18 \cdot r(\lambda) + 0.81 \cdot g(\lambda) + 0.01 \cdot b(\lambda) \\ z(\lambda) &= 0.00 \cdot r(\lambda) + 0.01 \cdot g(\lambda) + 0.99 \cdot b(\lambda) \end{aligned}$$

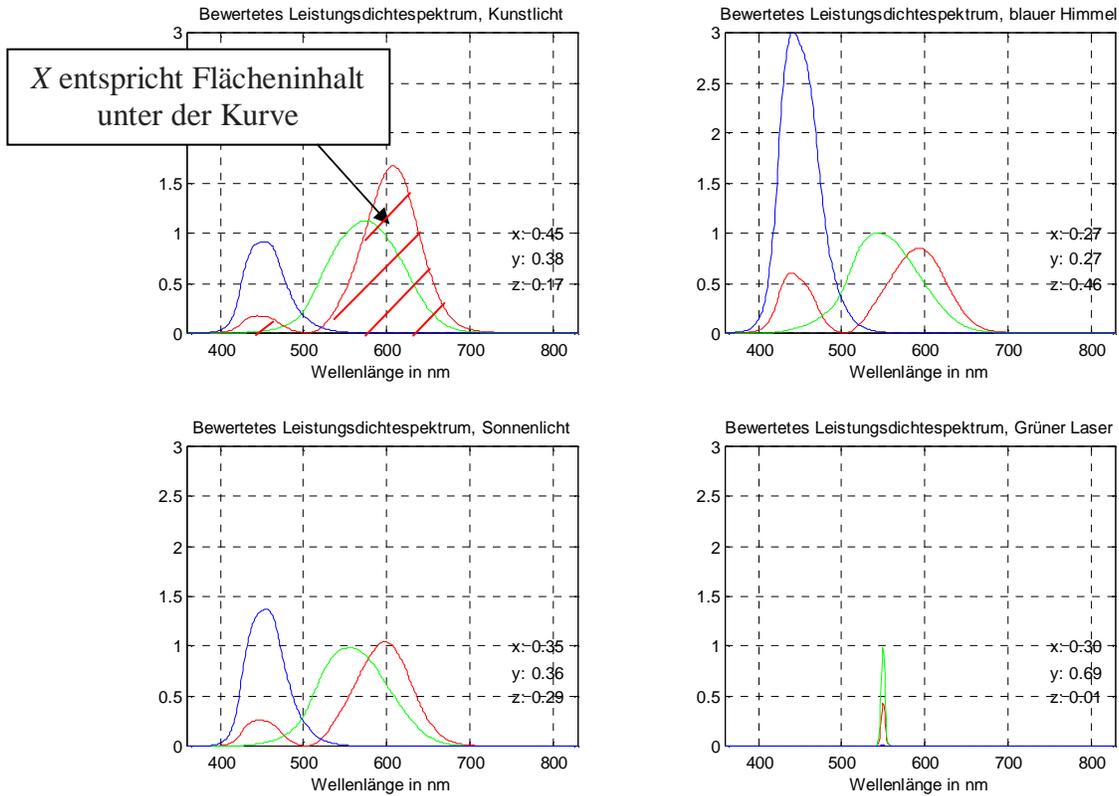
Die folgende Abbildung zeigt die Verläufe der resultierenden Spektralwertfunktionen:



Zunächst einmal wird deutlich, dass die Funktionen nur positive Werte annehmen. Die Funktion $y(\lambda)$ entspricht in etwa der Helligkeitsempfindlichkeit des Auges, die im grünen Wellenlängenbereich um 550 nm maximal ist. Wenn man jetzt für eine Lichtquelle mit einem bestimmten Leistungsdichtespektrum $P[\lambda]$ den resultierenden Farbwert errechnen will, so muss das Leistungsdichtespektrum mit den Spektralwertfunktionen gewichtet werden. Wir wollen dies am Beispiel einiger Lichtquellen nachvollziehen. In der folgenden Abbildung sind die relativen Leistungsdichtespektren von Sonnenlicht, Blauem Himmel, Kunstlicht und Grünem Laser skizziert, und zwar auf 100% bei 550 nm normiert.



Gewichtet man das Leistungsdichtespektrum einer Lichtquelle nun mit den Spektralwertfunktionen, d.h. multipliziert man $P[\lambda]$ jeweils mit $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$, so erhält man skalierte Spektralwertkurven, wie in den folgenden Abbildungen zu sehen ist.



Analog zur Darstellung im RGB-System ist eine Farbe nun als Vektor mit den Komponenten X , Y , und Z definiert:

$$\vec{F} = X \cdot \vec{x} + Y \cdot \vec{y} + Z \cdot \vec{z}$$

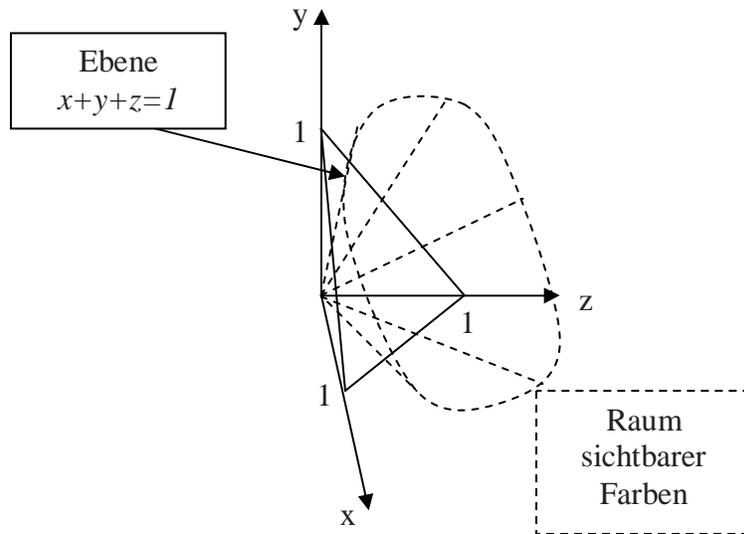
Die jeweiligen Anteile X , Y und Z für die einzelnen Lichtquellen ergeben sich aus den Flächeninhalten unter den resultierenden Kurven für die drei Farben. Man kann z.B. sehen, dass beim Kunstlicht der X -Anteil und damit der Rot-Anteil dominiert, während beim Blauen Himmel der Z -Anteil, bzw. der Blau-Anteil sehr stark ist. Um nun alle Farben gleichen Farbtyps und gleicher Sättigung, aber unterschiedlicher Helligkeit (Orange und Ocker, z.B.) auf einen Punkt im Bezugssystem abzubilden, wird nun noch die folgende Normierung durchgeführt:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

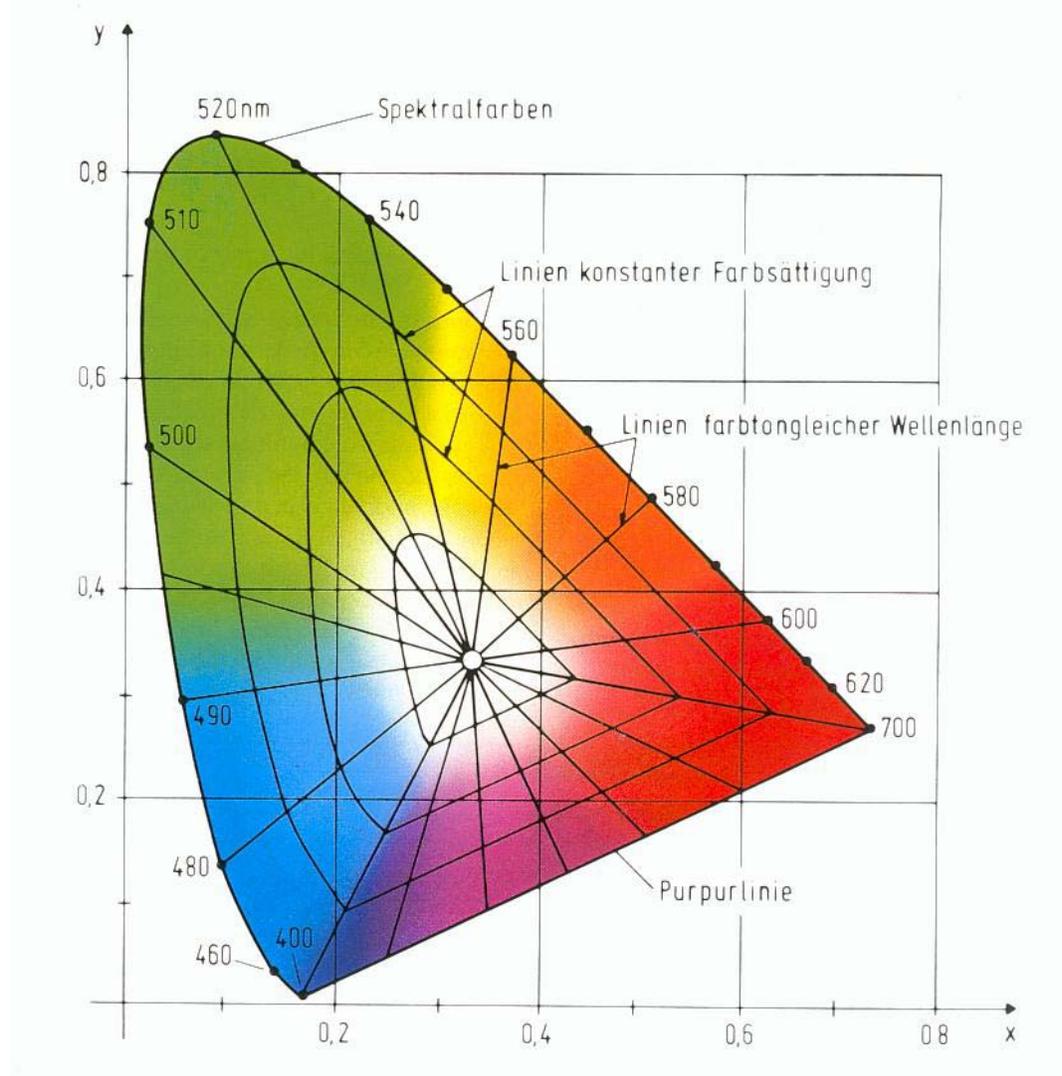
Damit gilt: $x+y+z=1$

Die resultierenden Koordinaten x , y und z für die vier ausgewählten Lichtquellen sind an den jeweiligen Abbildungen angegeben. Man sieht unter anderem, dass das Sonnenlicht relativ nahe am so genannten Weißpunkt, d.h. $x=y=z=0.33$ liegt, dem Fall, bei dem alle Grundfarben gleich stark beteiligt sind. Durch die vorgenommene Normierung ergibt sich, dass die Farben im Dreidimensionalen auf der Ebene $x+y+z=1$ liegen. Mit anderen Worten: Die Darstellung kann nun zweidimensional durch Projektion auf die x/y -Ebene erfolgen, da $z=1-x-y$.

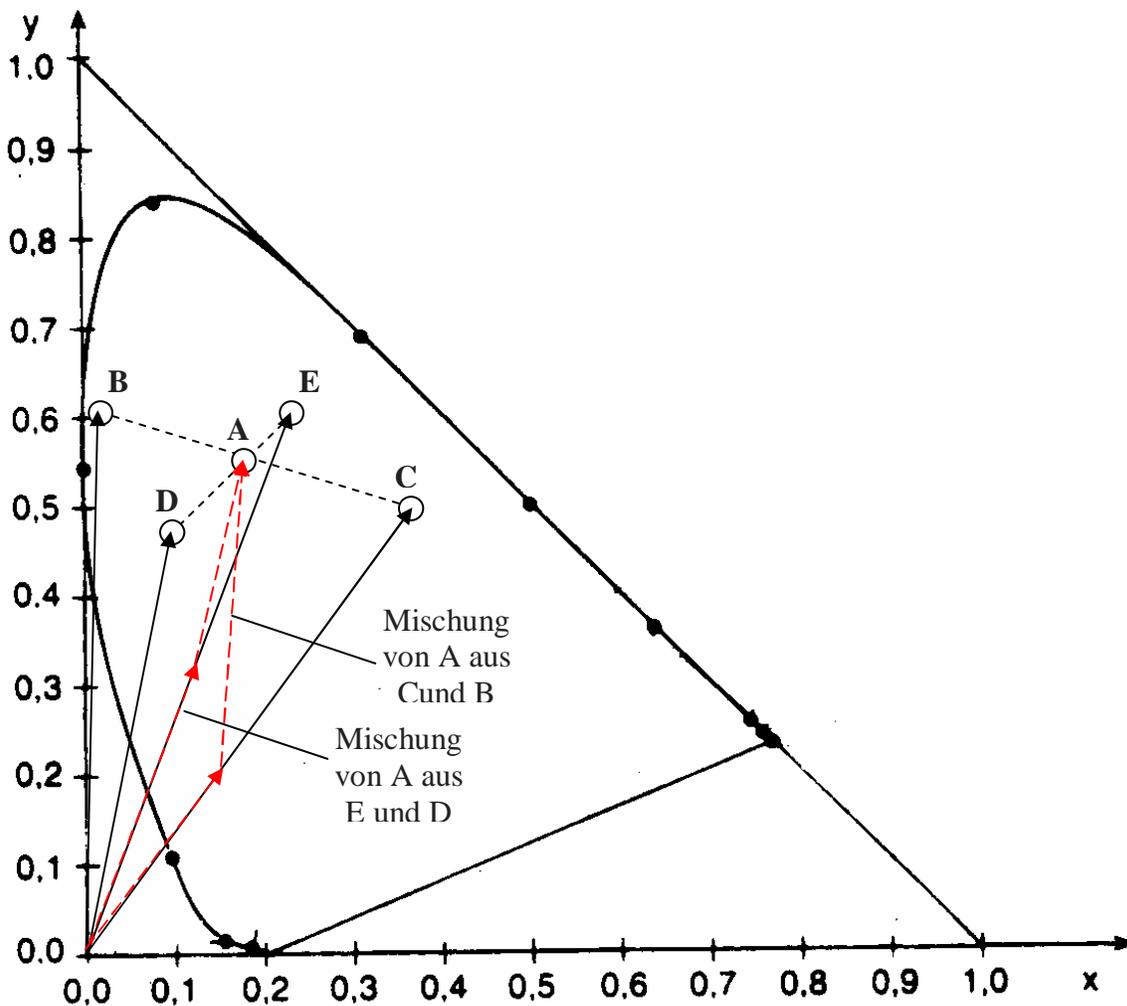
Allerdings sind nicht alle Farben auf dieser Ebene tatsächlich sichtbar. Der Raum der sichtbaren Farben liegt vielmehr in einem kegelförmigen Bereich, wie er in der folgenden Zeichnung gestrichelt angedeutet ist.



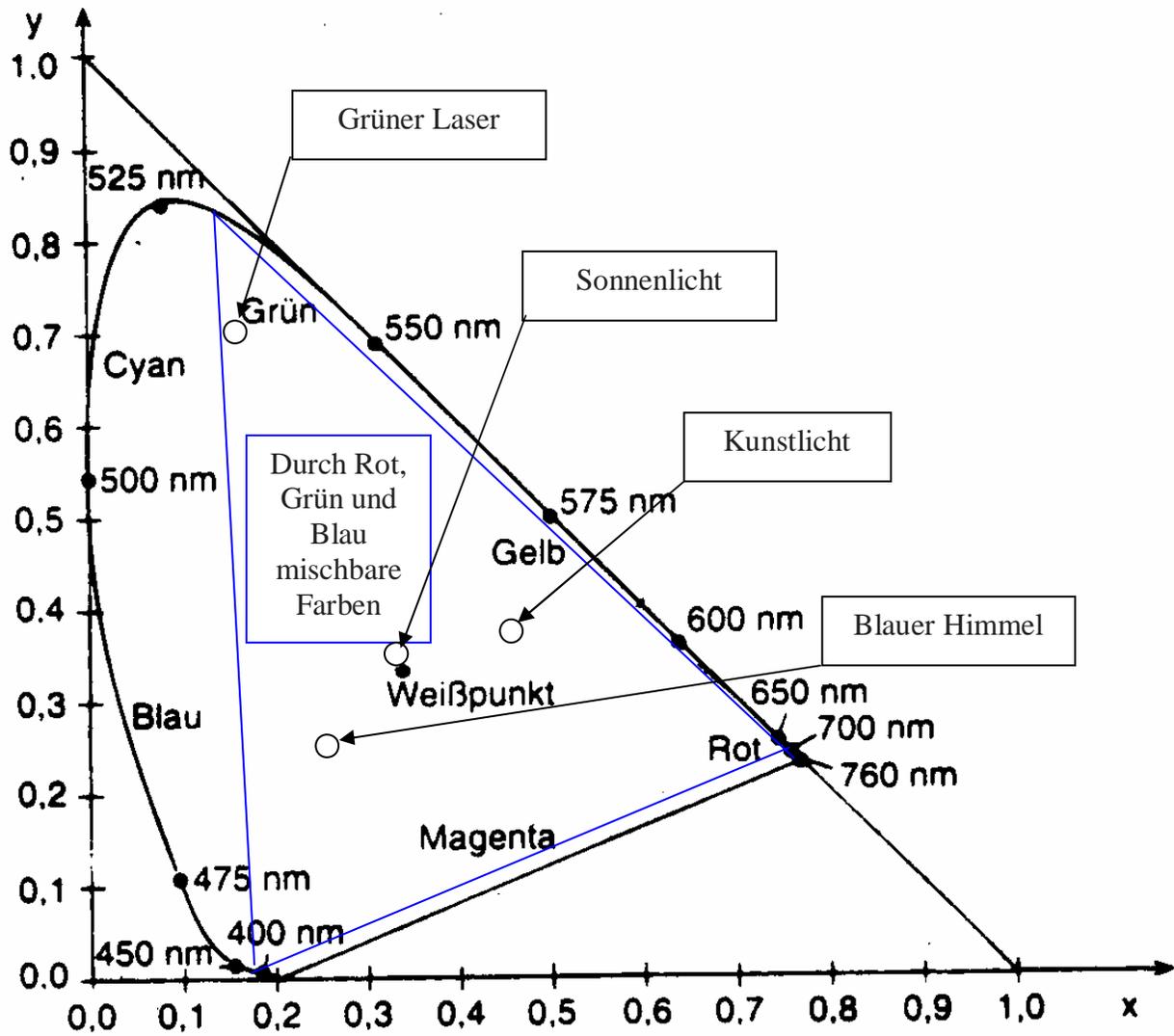
Projiziert man nun die Schnittfläche zwischen der Ebene $x+y+z=1$ und dem Kegel der sichtbaren Farben in die x/y-Ebene so erhält man das folgende IBK-Farbdiagramm:



Darin liegen die Koordinaten der reinen Spektralfarben auf dem Außenrand eines hufeisenförmigen Bereichs. Der Punkt minimaler Sättigung, d.h. der Weißpunkt, befindet sich bei den Koordinaten $x=y=0.33$, um den herum hufeisenförmig Linien gleicher Sättigung verlaufen. Die auf den Weißpunkt zulaufenden Linien bezeichnen Farben gleichen Typs. Die im Sonnenlicht nicht enthaltenen Purpurfarben liegen auf der so genannten Purpurlinie zwischen Blau und Rot. Das Diagramm ist insbesondere bedeutsam in Hinblick auf die Möglichkeit, eine Farbe aus zwei oder drei anderen zu ermischen. Da jeder Farbwert einem Vektor entspricht, lassen sich durch gewichtete Addition zweier Farben alle Farbtöne auf der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Farben im Diagramm ermischen. Das heißt unter anderem, dass es für jede Farbe eine Vielzahl von Möglichkeiten der Mischung gibt. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung: Die Farbe A kann sowohl durch gewichtete Addition der Farben B und C, als auch der Farben D und E ermischt werden. Damit wird noch einmal deutlich, dass kein eindeutiger Zusammenhang von einer wahrgenommenen Farbe zum Leistungsdichtespektrum der in dieser Farbe erscheinenden Lichtquelle führt.



Bei drei Farben ergibt sich der Raum der ermischbaren Farben als dreieckiger Bereich. Ein solcher Farbraum wird auch als Gamut bezeichnet. Es lässt sich somit am IBK-Diagramm ebenfalls zeigen, dass mit dem Farbsystem RGB nicht alle sichtbaren Farben mischbar sind, wie die folgende Abbildung veranschaulicht:



Die Farbwerte, die wir für die vier verschiedenen Lichtquellen bestimmt hatten, sind ebenfalls in der Zeichnung eingetragen