

Ein Analogon zu den ganzzahligen pythagoräischen Dreiecken

Autor(en): **Hasse, Helmut**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Elemente der Mathematik**

Band (Jahr): **32 (1977)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-32146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

ELEMENTE DER MATHEMATIK

Revue de mathématiques élémentaires – Rivista di matematica elementare

*Zeitschrift zur Pflege der Mathematik
und zur Förderung des mathematisch-physikalischen Unterrichts*

El. Math.

Band 32

Heft 1

Seiten 1–24

10. Januar 1977

Ein Analogon zu den ganzzahligen pythagoräischen Dreiecken

1. Auf ein solches Analogon wurde kürzlich durch eine Aufgabe von E. Kramer (Ljubljana) aufmerksam gemacht¹⁾, in der verlangt wurde, bestimmte Angaben über die arithmetische Natur der ganzzahligen primitiven Dreiecke mit Spitzenwinkel 120° zu bestätigen. Arithmetisch ausgedrückt handelt es sich um die Lösungen der diophantischen Gleichung

$$a^2 + ab + b^2 = c^2 \tag{1}$$

in teilerfremden natürlichen Zahlen a, b, c . Vom geometrischen wie auch vom arithmetischen Standpunkt aus erscheint es naturgemäss, auch die Dreiecke mit Spitzenwinkel 60° in die Betrachtung einzubeziehen, was auf die diophantische Gleichung

$$a^2 - ab + b^2 = c^2$$

hinausläuft, oder also auf die Zulassung auch negativer ganzer Zahlen in (1), wobei dann die beiden Fälle $ab > 0$ und $ab < 0$ (im folgenden *Plustyp* und *Minustyp* genannt) zu unterscheiden sind. Der Fall $ab = 0$ ist geometrisch wie arithmetisch uninteressant und sei im folgenden durchweg stillschweigend ausgeschlossen.

2. Es sei zunächst daran erinnert, dass die ganzzahligen primitiven *pythagoräischen* Dreiecke (Spitzenwinkel 90°)

$$a^2 + b^2 = c^2 \tag{2}$$

¹⁾ Amer. Math. Monthly 82 (1975), N° 10, E. 2566.

bekanntlich durch die Parameterdarstellung

$$a = u^2 - v^2, b = 2uv \text{ mit } (u, v) = 1, u \not\equiv v \pmod{2} \quad (3)$$

und dann

$$c = u^2 + v^2$$

geliefert werden. Man beweist das am elegantesten durch den Ansatz

$$\gamma = a + bi \text{ mit } i^2 = -1,$$

bei dem dann Normbildung $N(\gamma) = a^2 + b^2 = c^2$ liefert. Die bekanntlich eindeutige Primzerlegung im quadratischen Zahlkörper von $i = \sqrt{-1}$ lässt leicht erkennen, dass bei Primitivität der Lösung a, b, c von (2), d. h. für $(a, b) = 1$, und bei durch $a \equiv 1, b \equiv 0 \pmod{2}$ festgelegter Reihenfolge von a, b notwendig $\gamma = \varphi^2$ mit ganzem $\varphi = u + vi$ ist, woraus sich die angegebene Parameterdarstellung (3) ergibt.

3. Diese wohlbekanntes, hier nur kurz skizzierte Schlussführung für die pythagoräischen Dreiecke (2) überträgt sich auf die hier zu betrachtenden stumpf- bzw. spitzwinkligen Dreiecke (1) wie folgt.

Man setze

$$\gamma = a + b\rho = \frac{(2a+b) + b\sqrt{-3}}{2} \quad \text{mit} \quad \rho = \frac{1 + \sqrt{-3}}{2}$$

$$(\text{primitive 6. Einheitswurzel, } \rho^2 = \rho - 1). \quad (4)$$

Dann drückt sich die zu untersuchende Gleichung (1) wie folgt aus:

$$N(\gamma) = \frac{(2a+b)^2 + 3b^2}{2^2} = a^2 + ab + b^2 = c^2, \quad (5)$$

mit ganzrationalen teilerfremden a, b, c . Die so definierte ganze Zahl aus dem quadratischen Zahlkörper K von $\sqrt{-3}$ ist primitiv, d. h. ohne natürliche Teiler ausser 1. Daher ist γ nicht teilbar durch alle in K unzerlegten Primzahlen, die $p \equiv -1 \pmod{3}$, und auch nicht durch den Primteiler $1 + \rho$ der einzigen in K verzweigten Primzahl $3 \cong (1 + \rho)^2$, weil aus $1 + \rho | \gamma$ im Hinblick auf $N(1 + \rho) = 3$ nach (5) folgte $3 | c$ und daraus in geläufiger Weise der Reihe nach weiter $3 | 2a + b$, $3 | b$, $3 | a$, im Widerspruch zu der vorausgesetzten Primitivität der Lösung a, b, c .

In der bekanntlich eindeutigen Primzerlegung von γ in K treten demnach nur Primteiler π der in K vollzerlegten Primzahlen $p \equiv 1 \pmod{3}$ auf, und zwar jeweils höchstens einer der beiden konjugierten $\pi, \bar{\pi}$ und dieser im Hinblick auf (5) notwendig zu geradem Exponenten. Auf Grund dieser Beschaffenheit der Primzerlegung von γ hat man $\gamma = \varepsilon \varphi^2$ mit ganzem φ und einer Einheit $\varepsilon = \rho^v$ aus K . Wegen $\rho = -(\rho^2)^2$ kann dabei noch φ so normiert werden, dass $\varepsilon = \pm 1$, also $\gamma = \pm \varphi^2$ ist.

Sieht man von der Mitführung der entgegengesetzten $-a$, $-b$ zu den Lösungspaaren a, b von (1) ab, so kann man sich auf

$$\gamma = \varphi^2 \quad (6)$$

beschränken. Setze dann

$$\varphi = u + v\rho \quad (7)$$

mit ganzrationalen Koordinaten u, v , die wegen der Primitivität von γ (und damit von φ) teilerfremd sind und wegen $1 + \rho \nmid \gamma$ (und damit auch $\nmid \varphi$) der Inkongruenz $u \not\equiv v \pmod{3}$ genügen. Nach (4), (6), (7) drücken sich die zum Ausgang genommenen Lösungspaare a, b (von ihren entgegengesetzten abgesehen) wie folgt durch die Koordinaten u, v von φ als Parameter aus:

$$a = u^2 - v^2, b = 2uv + v^2 \text{ mit } (u, v) = 1, u \not\equiv v \pmod{3}, \quad (8)$$

und wie man leicht bestätigt, wird das zugehörige

$$c = u^2 + uv + v^2.$$

Umgekehrt liefert, wie leicht zu sehen, jedes derartige Paar u, v eine primitive Lösung a, b, c der Ausgangsgleichung (1). Auch diese weniger bekannte Parameterdarstellung findet sich bereits in der Literatur²⁾.

4. Wegen der Invarianz der Parameterdarstellung (8) bei gleichzeitiger Vorzeichenumkehr der Parameter u, v kann man sich auf etwa $v > 0$ beschränken. Zur Gewinnung einer Übersicht über die Lösungspaare a, b ersetzt man zweckmässig den Parameter u durch die Differenz $d = u - v$.

Die Parameterdarstellung (8) wird dann

$$\left. \begin{aligned} a &= 2dv + d^2 = d(d + 2v) \\ b &= 2dv + 3v^2 = v(2d + 3v) \end{aligned} \right\} \text{ mit } (d, v) = 1, d \not\equiv 0 \pmod{3}. \quad (9)$$

Für $d > 0$ sind dann auch $a, b > 0$, so dass Lösungspaare a, b vom Plustyp resultieren.

Für $d < 0$ hingegen hat man

$$\begin{aligned} ab < 0 & \text{ für } -d < \frac{3}{2}v \text{ oder } 2v < -d, \\ ab > 0 & \text{ für } \frac{3}{2}v < -d < 2v, \end{aligned}$$

²⁾ Siehe dazu Dickson, History of the Theory of Numbers II, S. 405, New York 1966.

so dass neben Lösungspaaren vom Minustyp auch nochmals solche vom Plustyp resultieren. Man kann aber ohne Verlust auf die so resultierenden negativen Lösungspaare vom Plustyp verzichten, weil deren entgegengesetzte, positive Lösungspaare $-a, -b$, oder vielmehr ihre vertauschten $-b, -a$, bereits unter den zuvor mit $d > 0$ gewonnenen Lösungspaaren vorkommen. Siehe dazu die Ausführungen über die Lösungsgesamtheit im Schlussabschnitt 6.

5. Lösungen vom Plustyp. Betrachte zunächst die beiden kleinsten Werte der Parameterdifferenz d . Die Parameterdarstellung (9) lautet für sie:

$$\left. \begin{array}{l} d=1 \\ \left\{ \begin{array}{l} a=2v+1 \\ b=2v+3v^2 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \text{ mit } v > 0 \text{ beliebig, } \left. \begin{array}{l} d=2 \\ \left\{ \begin{array}{l} a=4v+4 \\ b=4v+3v^2 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \text{ mit } v > 0 \text{ ungerade.}$$

Für $d=1$ ist die kleinere Lösungszahl a ungerade und durchläuft alle ungeraden natürlichen Zahlen ausser 1.

Für $d=2$ ist die eine Lösungszahl a durch 8 teilbar – es ist das vom Fall $v=1$ abgesehen die kleinere Lösungszahl –, und sie durchläuft alle durch 8 teilbaren natürlichen Zahlen, während die andere Lösungszahl b ungerade ist.

Allgemein erkennt man aus den Parameterformeln (9) leicht, dass nur ungerade oder durch 8 teilbare Lösungszahlen auftreten.

6. Übersicht über alle Lösungen. Durch wiederholte Anwendung der Substitution $\varphi \rightarrow \rho\varphi$, also

$$u + v\rho \rightarrow u\rho + v(\rho - 1) = -v + (u + v)\rho,$$

in Matrizenschreibweise

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix},$$

erhält man aus jedem Parameterpaar $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ ein Sextupel solcher Paare

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -v \\ u+v \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -(u+v) \\ u \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -u \\ -v \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} v \\ -(u+v) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u+v \\ -u \end{pmatrix},$$

und damit ein Tripel von Lösungspaaren

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -(a+b) \\ a \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} b \\ -(a+b) \end{pmatrix} \tag{10}$$

mit der Quersumme $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Durch Übergang zum Konjugiert-komplexen $\varphi \rightarrow \bar{\varphi}$, also $\gamma \rightarrow \bar{\gamma}$, und somit

$$a + b\rho \rightarrow a - b\rho^2 \rightarrow (a + b) - b\rho$$

erhält man dazu das Tripel

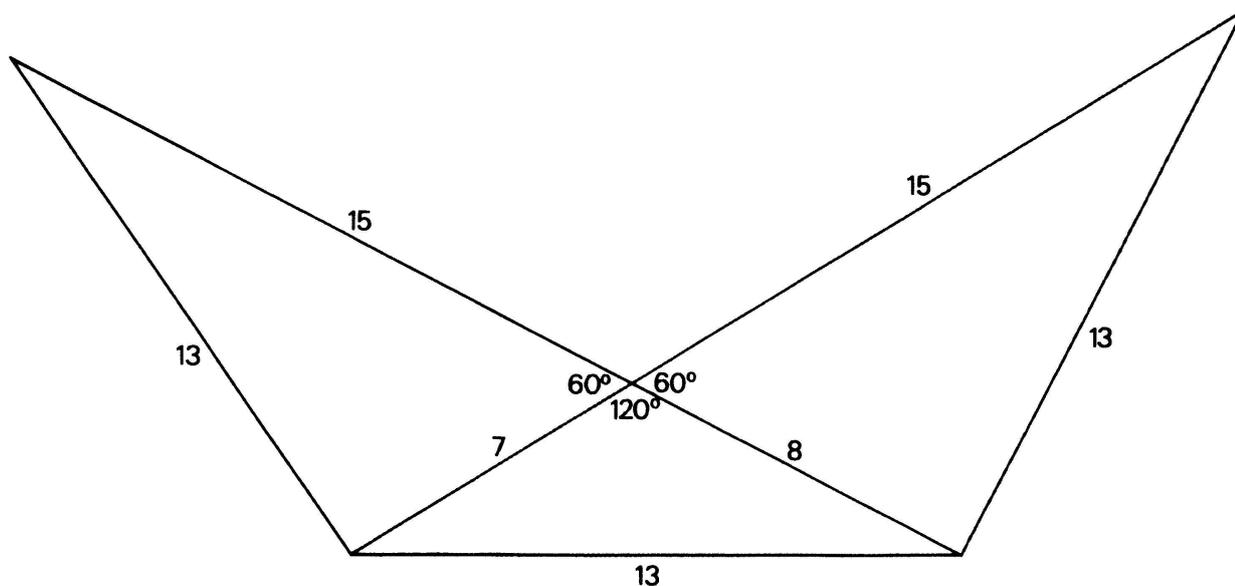
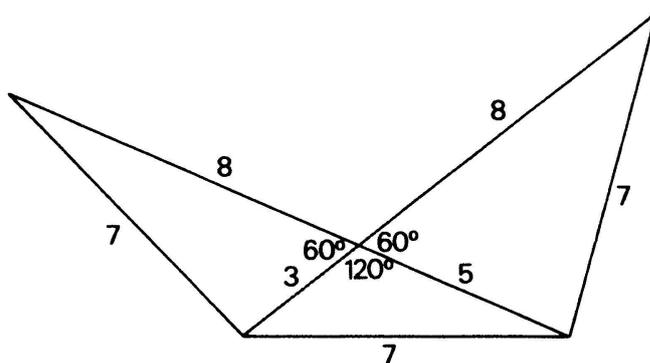
$$\begin{pmatrix} a+b \\ -b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -a \\ a+b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -b \\ -a \end{pmatrix}. \tag{10'}$$

Als einfachstes Beispiel seien die beiden kleinsten solchen Tripelpaare ($d=1, 2$ mit $v=1$ entsprechend) angeführt³⁾:

3	-8	5	7	-15	8
5	3	-8	8	7	-15
8	-3	-5	15	-7	-8
-5	8	-3	-8	15	-3.

In jedem solchen Dreieckstripel (10), (10') gibt es, wie aus der Quersumme $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$

leicht ersichtlich, genau ein positives Lösungspaar mit seinem entgegengesetzten vertauschten, beide vom Plustyp, während die beiden anderen Lösungspaare vom



³⁾ Siehe dazu auch die nachstehenden Figuren der zugehörigen Dreieckstripel.

Minustyp sind. Aus der im vorhergehenden Abschnitt 5 gewonnenen Übersicht über die arithmetische Natur der Lösungspaare vom Plustyp ist hiermit auch eine solche für die begleitenden Lösungspaare vom Minustyp gewonnen. *Auch in ihnen treten nur alle ungeraden natürlichen Zahlen ausser 1 und alle natürlichen Vielfachen von 8 auf.*

Die damit gewonnene Übersicht über die Lösungen der zugrundegelegten diophantischen Gleichung (1) kann auch auf mannigfache Weise durch elementararithmetische Betrachtungen innerhalb des rationalen Zahlkörpers gewonnen werden. Doch scheint mir, wie schon gesagt, die hier durchgeführte Heranziehung der eindeutigen Primzerlegung im Körper der sechsten Einheitswurzeln interessanter und eleganter.

Helmut Hasse, Hamburg

Untersuchungen zu einem hyperoskulierenden Büschel von Kegelschnitten

II. Teil

Als zweiter Zugang zu einem hyperoskulierenden Büschel von Kegelschnitten soll hier eine in der ebenen Kinematik auftretende birationale quadratische Transformation verwendet werden¹⁾.

Der erste Momentanpol P_1 eines ebenen Zwangslaufes liege im Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems. Die Polbahntangente falle mit der x -Achse zusammen, und der zweite, auf der y -Achse liegende Momentanpol P_2 – auch Wendepol genannt – habe die Koordinaten $P_2(0, -2\rho)$. Dann lautet die Gleichung des Wendekreises w im Bezugsmoment der Bewegung

$$x^2 + y^2 + 2\rho y = 0. \quad (1)$$

Alle von P_1 verschiedenen Punkte der Gangebene Γ , die sich mit dem Wendekreis decken, und nur diese, durchlaufen im Augenblick der Bewegung Wendepunkte ihrer Bahnkurve. Ein beliebiger Punkt $X(x, y)$ ist mit dem zugehörigen Krümmungsmittelpunkt $\mathfrak{X}(\xi, \eta)$ durch eine birationale quadratische Verwandtschaft T verknüpft. Die Transformationsformeln für T lauten bezüglich des vorgegebenen Koordinatensystems

$$\xi = \frac{2\rho xy}{x^2 + y^2 + 2\rho y}, \quad \eta = \frac{2\rho y^2}{x^2 + y^2 + 2\rho y}. \quad (2)$$

¹⁾ Im ersten Teil dieses Beitrages wurde eine von K.H. Schellbach eingeführte Konstruktion der Krümmungsmittelpunkte zur Untersuchung eines hyperoskulierenden Kegelschnittbüschels ausgewertet [5].