

Zeitschrift: Commentarii Mathematici Helvetici
Herausgeber: Schweizerische Mathematische Gesellschaft
Band: 28 (1954)

Artikel: Relativquadratische Zahlkörper, deren Klassenzahl durch eine vorgegebene ungerade Primzahl teilbar ist.
Autor: Gut, Max
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-22622>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Relativquadratische Zahlkörper, deren Klassenzahl durch eine vorgegebene ungerade Primzahl teilbar ist

von MAX GUT, Zürich

Herrn Paul Finsler zum sechzigsten Geburtstage gewidmet

Es bedeute p eine beliebige ungerade Primzahl und ζ die p -te Einheitswurzel $\zeta = e^{\frac{2\pi i}{p}}$. Es sei ferner k ein algebraischer Zahlkörper von endlichem Grade, der ζ enthält, und in welchem wenigstens ein p teilendes Primideal \mathfrak{p} von k den absoluten Grad 1 hat. Dies ist jedenfalls für den Körper der p -ten Einheitswurzeln der Fall, denn für $\lambda = 1 - \zeta$ ist in diesem Körper $p = (\lambda)^{p-1}$, wo das Primideal (λ) vom 1. Grade ist.

In der vorliegenden Arbeit beweisen wir den

Satz: Es gibt unter den beiden über k gemachten Voraussetzungen unendlich viele in bezug auf k relativquadratische Zahlkörper K , deren Klassenzahl durch p teilbar ist.

Wir werden jedoch wesentlich nicht nur zeigen, daß unendlich viele solche Körper K existieren, sondern geben in jedem Falle explizite eine algebraische Zahl vom Relativgrade $2p$ in bezug auf k an, deren Adjunktion zu K ein Stück des Hilbertschen Klassenkörpers von K liefert, das in bezug auf K den Relativgrad p hat.

Ein Polynom heiße *normiert*, wenn der Koeffizient der höchsten Potenz gleich 1 ist.

Es sei z eine freie Variable und

$$x = z + \frac{1}{z}. \quad (1)$$

Ist dann n eine beliebige natürliche Zahl, so ist identisch in z :

$$z^n + \frac{1}{z^n} = G_n(x),$$

wo $G_n(x)$ ein wohlbestimmtes, normiertes, ganzrationalzahliges Polynom

vom Grade n in x ist, dessen Koeffizienten uns hier übrigens nicht weiter interessieren. Es ist also, um möglichst klar zu sein:

$$z + \frac{1}{z} = G_1(x) = x,$$

$$z^2 + \frac{1}{z^2} = G_2(x) = x^2 - 2,$$

$$z^3 + \frac{1}{z^3} = G_3(x) = x^3 - 3x$$

usf.

Setzt man $z = 1$, so wird $x = 2$, und man erkennt, daß für jede natürliche Zahl n :

$$2 = G_n(2). \quad (2)$$

Wir beweisen zunächst folgenden

Hilfssatz: Für $n \geq 3$ und $k = 1, 2, \dots, n - 1$ gilt die Formel:

$$\frac{G_n^{(k)}(2)}{(k-1)! n} = \binom{n+k-1}{2k-1} = \binom{n+k-1}{n-k}. \quad (3)$$

Beweis: Es ist gemäß (1):

$$\frac{dx}{dz} = 1 - \frac{1}{z^2} = \frac{z^2 - 1}{z^2},$$

also

$$\frac{dz}{dx} = \frac{z^2}{z^2 - 1}.$$

Folglich ist für $n \geq 3$:

$$\begin{aligned} \frac{G'_n(x)}{n} - \frac{G'_{n-2}(x)}{n-2} &= \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{n} \left(z^n + \frac{1}{z^n} \right) - \frac{1}{n-2} \left(z^{n-2} + \frac{1}{z^{n-2}} \right) \right] \cdot \frac{dz}{dx} \\ &= \left[z^{n-1} - \frac{1}{z^{n+1}} - z^{n-3} + \frac{1}{z^{n-1}} \right] \frac{z^2}{z^2 - 1} \\ &= \left[z^{n-3}(z^2 - 1) + \frac{1}{z^{n+1}}(z^2 - 1) \right] \frac{z^2}{z^2 - 1} \\ &= z^{n-1} + \frac{1}{z^{n-1}} = G_{n-1}(x), \end{aligned}$$

also

$$\frac{G'_n(x)}{n} = \frac{G'_{n-2}(x)}{n-2} + G_{n-1}(x).$$

Mithin wird für $k = 1, 2, \dots, n - 1$, falls unter $G_n^{(0)}(x) \equiv G_n(x)$ verstanden wird:

$$\frac{G_n^{(k)}(x)}{n} = \frac{G_{n-2}^{(k)}(x)}{n-2} + G_{n-1}^{(k-1)}(x).$$

Es folgt

$$\frac{G_{n-2}^{(k)}(x)}{n-2} = \frac{G_{n-4}^{(k)}(x)}{n-4} + G_{n-3}^{(k-1)}(x)$$

usf. . . .

Falls n ungerade, ist schließlich

$$\frac{G_3^{(k)}(x)}{3} = \frac{G_1^{(k)}(x)}{1} + G_2^{(k-1)}(x).$$

Daher ist für ungerades n , wie sich durch Addition dieser $\frac{n-1}{2}$ Gleichungen ergibt

$$\frac{G_n^{(k)}(x)}{n} = G_1^{(k)}(x) + \{G_{n-1}^{(k-1)}(x) + G_{n-3}^{(k-1)}(x) + G_{n-5}^{(k-1)}(x) + \dots + G_2^{(k-1)}(x)\}.$$

Falls n gerade ist, ist schließlich:

$$\frac{G_4^{(k)}(x)}{4} = \frac{G_2^{(k)}(x)}{2} + G_3^{(k-1)}(x)$$

und

$$\frac{G_2^{(k)}(x)}{2} = G_1^{(k-1)}(x).$$

Folglich ist für gerades n , wie sich durch Addition dieser $\frac{n}{2}$ Gleichungen ergibt:

$$\frac{G_n^{(k)}(x)}{n} = \{G_{n-1}^{(k-1)}(x) + G_{n-3}^{(k-1)}(x) + G_{n-5}^{(k-1)}(x) + \dots + G_1^{(k-1)}(x)\}.$$

Insbesondere ist mithin für ungerades n :

$$\frac{G_n^{(k)}(2)}{n} = G_1^{(k)}(2) + \sum_{r=0}^{\frac{n-3}{2}} G_{n-1-2r}^{(k-1)}(2) \quad (4)$$

und für gerades n :

$$\frac{G_n^{(k)}(2)}{n} = \sum_{r=0}^{\frac{n-2}{2}} G_{n-1-2r}^{(k-1)}(2). \quad (5)$$

Wir beweisen die Formel (3) für $k = 1$. Ist n ungerade, so ist gemäß (4) und (2):

$$\frac{G_n'(2)}{n} = 1 + \sum_{r=0}^{\frac{n-3}{2}} 2 = 1 + \frac{n-1}{2} \cdot 2 = n.$$

Ist n gerade, so ist gemäß (5) und (2):

$$\frac{G'_n(2)}{n} = \sum_{r=0}^{\frac{n-2}{2}} 2 = 2 \cdot \frac{n}{2} = n.$$

Die Formel (3) ist mithin richtig für $k = 1$.

Für festgehaltenes n nehmen wir an, die Formel (3) sei richtig für k , wo $1 \leq k \leq n - 2$ ist, und zeigen, daß sie richtig ist für $k + 1$.

Für *ungerades* n wird gemäß (4), da $G_1^{(k+1)}(2) = 0$ ist:

$$\frac{G_n^{(k+1)}(2)}{n} = \sum_{r=0}^{\frac{n-3}{2}} G_{n-1-2r}^{(k)}(2) = \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} G_{n-1-2r}^{(k)}(2).$$

Für *gerades* n wird gemäß (5):

$$\frac{G_n^{(k+1)}(2)}{n} = \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} G_{n-1-2r}^{(k)}(2).$$

Mithin ist für jedes $n \geq 3$ nach Induktionsvoraussetzung:

$$\begin{aligned} \frac{G_n^{(k+1)}(2)}{n} &= (k-1)! \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} (n-1-2r) \binom{n+k-2-2r}{2k-1} \\ &= k! \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} \frac{(n+k-1-2r) - k}{k} \binom{n+k-2-2r}{2k-1} \\ &= k! \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} \left\{ 2 \binom{n+k-1-2r}{2k} - \binom{n+k-2-2r}{2k-1} \right\} \\ &= k! \sum_{r=0}^{\left[\frac{n-2}{2}\right]} \left\{ \binom{n+k-1-2r}{2k} + \binom{n+k-2-2r}{2k} \right\} \\ &= k! \sum_{s=1}^{n-k} \binom{n+k-s}{2k} = k! \binom{n+k}{2k+1}, \end{aligned}$$

womit unser Hilfssatz bewiesen ist.

Insbesondere folgt für jede ungerade Primzahl p :

$$\frac{G_p^{(k)}(2)}{k!} = \frac{p}{k} \binom{p+k-1}{2k-1} = \frac{p}{k} \binom{p+k-1}{p-k}, \quad k = 1, 2, \dots, p-1. \quad (6)$$

Da $G_p(x)$ ein normiertes ganzrationalzahliges Polynom p -ten Grades ist, sind die Größen (6) ganz rational.

Wir wenden uns zum Beweise des Hauptsatzes.

Es sei γ eine beliebige ganze Zahl von k , die zu $2p$ teilerfremd und quadratischer Rest mod. p ist:

$$\gamma \equiv c^2 \not\equiv 0 \pmod{p}, \quad (7)$$

wo c ganz rational ist, und wir betrachten das normierte Polynom vom ungeraden Primzahlgrade p

$$G_p(x) - \lambda^{2p}\gamma - 2, \quad (8)$$

dessen Koeffizienten ganze Zahlen von k sind. Wir setzen

$$x = 2 + \lambda^2 y$$

und zur Abkürzung:

$$f(y) = y^p + \sum_{k=p-1}^1 \frac{G_p^{(k)}(2)}{k! \lambda^{2(p-k)}} y^k - \gamma. \quad (9)$$

Beachten wir, daß $G_p(2) = 2$ gemäß (2), so sehen wir, daß

$$\begin{aligned} G_p(x) - \lambda^{2p}\gamma - 2 &= G_p(2 + (x - 2)) - \lambda^{2p}\gamma - 2 = \\ &= (x - 2)^p + \sum_{k=p-1}^1 \frac{G_p^{(k)}(2)}{k!} (x - 2)^k - \lambda^{2p}\gamma = \lambda^{2p} \cdot f(y). \end{aligned}$$

Da $p = -\lambda^{p-1}\varepsilon$ ist, wo ε eine Einheit des Körpers der p -ten Einheitswurzeln ist, für welche

$$\varepsilon \equiv 1 \pmod{(\lambda)},$$

so folgt aus (6):

Die auf den linken Seiten der folgenden vier Kongruenzen stehenden Zahlen sind ganze Zahlen des Körpers der p -ten Einheitswurzeln und

1. für $k = p - 1, p - 2, \dots, \frac{p+3}{2}$ ist:

$$\frac{G_p^{(k)}(2)}{k! \lambda^{2(p-k)}} \equiv 0 \pmod{(\lambda)}$$

2. für $k = \frac{p+1}{2}$ ist:

$$\frac{G_p^{\binom{p+1}{2}}(2)}{\left(\frac{p+1}{2}\right)! \lambda^{p-1}} \equiv -2 \pmod{(\lambda)}$$

3. für $k = \frac{p-1}{2}, \frac{p-3}{2}, \dots, 2$ ist:

$$\frac{G_p^{(k)}(2)}{k! \lambda^{2(p-k)}} \equiv 0 \pmod{(\lambda)}$$

4. Für $k = 1$ ist:

$$\frac{G_p'(2)}{1! \lambda^{2(p-1)}} \equiv 1 \pmod{(\lambda)}.$$

Mithin wird gemäß (9) und (7)

$$f(y) \equiv y^p - 2y^{\frac{p+1}{2}} + y - c^2 \equiv y(y^{\frac{p-1}{2}} - 1)^2 - c^2 \pmod{p}. \quad (10)$$

Das Polynom $f(y)$ hat mod. p weder einen Linearfaktor noch ein mod. p irreduzibles Polynom 2. Grades als Faktor. Denn betrachtet man die Kongruenz (10) als eine Gleichung im Galoisfeld $GF(p^2)$, wobei dann c eine von 0 verschiedene Größe des Unterkörpers $GF(p)$, d. h. des Primkörpers der Charakteristik p ist, so besitzt das Polynom (10) im $GF(p^2)$ keinen Linearfaktor. In der Tat folgt aus

$$y(y^{\frac{p-1}{2}} - 1)^2 = c^2,$$

daß y gleich dem Quadrat eines Elementes des $GF(p^2)$ sein muß, $y = \eta^2 \neq 0$, und dann folgt

$$\eta(\eta^{p-1} - 1) = \eta^p - \eta = \pm c.$$

Wendet man auf die letzte Gleichung den von der Identität verschiedenen Automorphismus des $GF(p^2)$ an, so folgt

$$\eta^{p^2} - \eta^p = \eta - \eta^p = \pm c,$$

und die Addition der beiden letzten Gleichungen führt zum Widerspruch, daß $c = 0$ sein müßte.

Eine beliebige Nullstelle der Gleichung

$$G_p(x) - \lambda^{2p}\gamma - 2 = 0 \quad (11)$$

legt daher einen Körper fest, der in bezug auf k mindestens vom dritten Relativgrad ist.

Es sei jetzt γ ein Produkt von endlich vielen voneinander verschiedenen rationalen ungeraden Primzahlen, das zur Körperdiskriminanten von k teilerfremd und quadratischer Rest mod. p ist. Insbesondere darf das Produkt auch aus nur einem einzigen Faktor bestehen.

Wir setzen in der Gleichung (11) die Größe $x = z + \frac{1}{z}$. Dadurch geht sie über in die Gleichung

$$z^{2p} - (\lambda^{2p}\gamma + 2)z^p + 1 = 0. \quad (12)$$

Setzt man

$$z^p = u, \quad (13)$$

so wird

$$u^2 - (\lambda^{2p}\gamma + 2)u + 1 = 0. \quad (14)$$

Die Diskriminante D dieser Gleichung ist

$$D = \lambda^{2p}\gamma \cdot (\lambda^{2p}\gamma + 4).$$

D ist keine Quadratzahl von k . Denn jedes Primideal von k , welches ein Teiler des Hauptideales (D) von k ist, müßte in einer *geraden* Potenz in (D) als Faktor enthalten sein. Das ist aber nicht möglich, denn γ ist zu $\lambda^{2p}\gamma + 4$ teilerfremd, und jeder Primidealteiler der ganzen rationalen Zahl γ ist in k unverzweigt. Mithin ist der Relativgrad von $K = k(u)$ in bezug auf k gleich 2. Übrigens ist die Relativediskriminante von K in bezug auf k zu p teilerfremd. Denn K kann aus k auch erhalten werden durch Adjunktion von v , wo

$$v = \frac{u - 1}{\lambda^p}.$$

Für $u = 1 + \lambda^p v$ geht aber (14) über in die Gleichung

$$v^2 - \lambda^p \gamma v - \gamma = 0.$$

v ist mithin algebraisch ganz, und die Diskriminante dieser Gleichung ist

$$\gamma(\lambda^{2p}\gamma + 4) = \frac{D}{\lambda^{2p}},$$

also zu p teilerfremd.

Ist z_1 eine willkürlich aber fest gewählte Nullstelle der Gleichung (12), so werden alle $2p$ Nullstellen von (12) durch die $2p$ algebraischen Einheiten

$$z_t = \zeta^{t-1} z_1, z_{p+t} = \frac{\zeta^{1-t}}{z_1}, t = 1, 2, \dots, p,$$

gegeben und gemäß (13) und (14) hängen sowohl K wie $K(z_1) = K(z)$ nicht ab von der Wahl von z_1 . Die p Nullstellen des Polynoms (11) werden gegeben durch

$$x_t = z_t + \frac{1}{z_t} = \zeta^{t-1} z_1 + \frac{\zeta^{1-t}}{z_1}, t = 1, 2, \dots, p.$$

Der Körper $K(z_1)$ hat in bezug auf K den Relativgrad p oder den Relativgrad 1. Aber das letztere ist nicht möglich, denn sonst hätte z_1 in bezug auf k den Relativgrad 2. Mithin müßte auch

$$x_1 = z_1 + \frac{1}{z_1}$$

in bezug auf k den Relativgrad 2 oder 1 haben. Aber oben haben wir gezeigt, daß x_1 in bezug auf k mindestens vom dritten Relativgrade ist.

Gemäß (13) und (14) gilt für die algebraische Einheit z_1 :

$$z_1^p = \frac{1}{2} (\lambda^{2p}\gamma + 2 \pm \sqrt{D}),$$

also

$$z_1^p \equiv 1 \equiv 1^p \pmod{(\lambda)^p},$$

und daher¹⁾ ist $K(z_1)$ ein Unterkörper des Hilbertschen (absoluten) Klassenkörpers von K , der in bezug auf K den Relativgrad p hat. Folglich ist die Klassenzahl von K durch p teilbar.

Hat man durch geeignete Wahl von $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_s$ so schon s voneinander verschiedene in bezug auf k relativquadratische Körper

$$K_1, K_2, \dots, K_s,$$

deren Klassenzahl je durch p teilbar ist, konstruiert – für $s = 1$ ist dies ja der Fall – so hat man γ_{s+1} nur so zu wählen, daß die in γ_{s+1} aufgehende oder aufgehenden ungeraden rationalen Primzahlen zur Diskriminanten von k , zu $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_s$ und zu $\lambda^{2p}\gamma_1 + 4, \lambda^{2p}\gamma_2 + 4, \dots, \lambda^{2p}\gamma_s + 4$ (bzw. den absoluten Normen dieser s Zahlen, genommen im Körper der p -ten Einheitswurzeln) teilerfremd sind, und γ_{s+1} quadratischer Rest mod. p ist. Dann ist K_{s+1} ein von den Körpern K_1, K_2, \dots, K_s verschiedener Körper mit den verlangten Eigenschaften. Es gibt mithin unendlich viele solche Körper K_s .

(Eingegangen den 5. April 1954)

¹⁾ Vgl. z. B. *Hecke, Erich*: Vorlesungen über die Theorie der algebraischen Zahlen, Leipzig 1923, § 39, p. 148–154.