

# Kleine Mitteilungen

Objektyp: **Group**

Zeitschrift: **Elemente der Mathematik**

Band (Jahr): **26 (1971)**

Heft 2

PDF erstellt am: **26.09.2024**

## **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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*  
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, [www.library.ethz.ch](http://www.library.ethz.ch)

<http://www.e-periodica.ch>

# Kleine Mitteilungen

## Semi- $k$ -free Integers

Let  $k$  be a fixed integer  $\geq 2$ . A positive integer  $n$  is called semi- $k$ -free if the multiplicity of each prime factor of  $n$  is not equal to  $k$  or equivalently, if  $n$  is not divisible unitarily by the  $k$ -th power of any prime. The integer 1 is also considered to be semi- $k$ -free. Let  $x$  denote a real variable  $\geq 1$  and let  $Q_k^*(x)$  denote the number of semi- $k$ -free integers  $\leq x$ . The object of the present note is to prove the following:

*Theorem.*

$$Q_k^*(x) = \alpha_k^* x + O(x^{1/k}),$$

where

$$\alpha_k^* = \prod_p \left( 1 - \frac{1}{p^k} + \frac{1}{p^{k+1}} \right),$$

the product being extended over all primes  $p$ .

Let  $\mu(n)$  denote the Möbius function and  $\varphi(x, n)$  denote the Legendre totient function, defined to be the number of positive integers  $\leq x$  which are prime to  $n$ . Let  $\varphi(n) = \varphi(n, n)$  be the Euler totient function. We need the following three lemmas to prove the above theorem.

*Lemma 1.* For each  $s$ ,  $0 \leq s < 1$ , we have

$$\varphi(x, n) = x \frac{\varphi(n)}{n} + O(x^s \sigma_{-s}(n)),$$

where  $\sigma_{-s}(n)$  is the sum of the  $s$ -th powers of the reciprocals of the divisors of  $n$ .

*Proof:* It is well-known that  $\varphi(x, n) = \sum_{d|n} \mu(d) [x/d]$ . Since  $[x] = x + O(x^s)$ , for every  $s$  with  $0 \leq s < 1$ , we have

$$\varphi(x, n) = \sum_{d|n} \mu(d) \left\{ \frac{x}{d} + O\left(\frac{x^s}{d^s}\right) \right\} = x \frac{\varphi(n)}{n} + O\left(x^s \sum_{d|n} d^{-s}\right).$$

Hence lemma 1 follows.

*Lemma 2.*

$$\alpha_k^* \equiv \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu(n) \varphi(n)}{n^{k+1}} = \prod_p \left( 1 - \frac{1}{p^k} + \frac{1}{p^{k+1}} \right).$$

*Proof:* Since  $\mu(n)$  and  $\varphi(n)$  are multiplicative and the series is absolutely convergent, we can expand the series into an infinite product of Euler type (cf. [1], theorem 286). Hence, we have

$$\alpha_k^* = \prod_p \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\mu(p^m) \varphi(p^m)}{p^{m(k+1)}} \right\} = \prod_p \left\{ 1 - \frac{p-1}{p^{k+1}} \right\},$$

so that lemma 2 follows.

*Lemma 3* (cf. [2], theorem 2.4). If  $g(n)$  and  $h(n)$  are multiplicative, then  $f_k(n) = \sum_{\substack{d^k \delta = n \\ (d, \delta) = 1}} g(d) h(\delta)$  is also multiplicative.

*Proof of the theorem.* Let  $q_k^*(n) = \sum_{\substack{d^k \delta = n \\ (d, \delta) = 1}} \mu(d)$ . Then by lemma 3, it follows that  $q_k^*(n)$  is multi-

plicative. Moreover,  $q_k^*(p^\alpha) = 1$  or  $0$  according as  $\alpha \neq k$  or  $\alpha = k$ . Hence  $q_k^*(n) = 1$  or  $0$  according as  $n$  is or is not semi- $k$ -free, so that

$$\begin{aligned} Q_k^*(x) &= \sum_{n \leq x} q_k^*(n) = \sum_{n \leq x} \sum_{\substack{d^k \delta = n \\ (d, \delta) = 1}} \mu(d) = \sum_{\substack{d^k \delta \leq x \\ (d, \delta) = 1}} \mu(d) \\ &= \sum_{\substack{d < \sqrt[k]{x} \\ (d, d) = 1}} \mu(d) \sum_{\substack{\delta \leq x/d^k \\ (\delta, d) = 1}} 1 = \sum_{\substack{d < \sqrt[k]{x} \\ (d, d) = 1}} \mu(d) \varphi\left(\frac{x}{d^k}, d\right). \end{aligned}$$

Hence by lemmas 1 and 2,

$$\begin{aligned}
 Q_k^*(x) &= \sum_{\substack{k \\ n \leq \sqrt[k]{x}}} \mu(n) \left\{ x \frac{\varphi(n)}{n^{k+1}} + O\left(x^s \frac{\sigma_{-s}(n)}{n^{sk}}\right) \right\} \\
 &= x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu(n) \varphi(n)}{n^{k+1}} + O\left(x \sum_{\substack{k \\ n > \sqrt[k]{x}}} \frac{1}{n^k}\right) + O\left(x^s \sum_{\substack{k \\ n \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{\sigma_{-s}(n)}{n^{sk}}\right) \\
 &= \alpha_k^* x + O(x^{1/k}) + O\left(x^s \sum_{\substack{k \\ n \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{\sigma_{-s}(n)}{n^{sk}}\right). \tag{1}
 \end{aligned}$$

Now, choosing  $0 < s < 1/k$ , we obtain

$$\begin{aligned}
 \sum_{\substack{k \\ n \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{\sigma_{-s}(n)}{n^{sk}} &= \sum_{\substack{k \\ n \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{1}{n^{sk}} \sum_{d \mid n} \frac{1}{d^s} = \sum_{\substack{k \\ d \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{1}{d^{s(1+k)}} \sum_{\substack{k \\ \delta \leq \frac{\sqrt[k]{x}}{d}}} \frac{1}{\delta^{sk}} \\
 &= O\left(\sum_{\substack{k \\ d \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{1}{d^{s(1+k)}} \left(\frac{\sqrt[k]{x}}{d}\right)^{1-sk}\right) = O\left(x^{1/k-s} \sum_{\substack{k \\ d \leq \sqrt[k]{x}}} \frac{1}{d^{s+1}}\right) = O(x^{1/k-s}).
 \end{aligned}$$

Hence from (1), the theorem follows.

D. SURYANARAYANA, Waltair, India

#### REFERENCES

- [1] G. H. HARDY and E. M. WRIGHT, *An Introduction to the Theory of Numbers*, 4th ed. (Oxford 1965).
- [2] D. SURYANARAYANA, *Two Arithmetic Functions and Asymptotic Densities of Related Sets*, Portugaliae Mathematica (to appear in vol. 30 (1971)).

### Bemerkung zu einer Anwendung des Bertrandschen Postulats in der Zahlentheorie

Durch Anwendung des Bertrandschen Postulats kann man das folgende interessante Ergebnis beweisen:

Keine der Partialsummen

$$s_n = 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \quad (n > 1)$$

der harmonischen Reihe  $\sum_{k=1}^{\infty} 1/k$  ist ganz (siehe [1], S. 139, Exercise 2).

Eine der erwähnten Anwendung des Bertrandschen Postulats ähnliche Methode ermöglicht uns, einige Ergebnisse über Partialsummen einiger Teilreihen der harmonischen Reihe zu beweisen (die Teilreihen der harmonischen Reihe nennt man Ahmessche Reihen, vgl. [2]).

Im folgenden bedeutet  $a_1 < a_2 < \dots$  eine Folge von natürlichen Zahlen und  $P(x)$  bezeichnet die Anzahl derjenigen Indices  $i$ , für welche  $a_i \leq x$  ( $x$  ist eine reelle Zahl) und  $a_i$  eine Primzahl ist.

**Satz 1.** Haben  $a_1 < a_2 < \dots$  und  $P(x)$  die vorige Bedeutung und setzen wir voraus, dass für ein geeignetes  $m$  die Ungleichung

$$\frac{P(a_m)}{P\left(\frac{a_m}{2}\right)} > 1$$

gilt, dann ist die Summe  $S_m = \sum_{k=1}^m 1/a_k$  nicht ganz.

*Beweis.* Nach Voraussetzung ist  $P(a_m/2) < P(a_m)$ . Aus der Definition von  $P(x)$  folgt die Existenz eines Index  $i \leq m$ , mit der Eigenschaft, dass  $a_i$  eine Primzahl  $p$  ist und

$$\frac{a_m}{2} < p \leq a_m \tag{1}$$

gilt.

Bezeichnen wir mit  $B$  das kleinste gemeinsame Vielfache der Zahlen  $a_1, a_2, \dots, a_m$  und setzen  $A_k = B/a_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ), dann haben wir

$$S_m = \frac{A}{B}, \quad A = \sum_{k=1}^m A_k. \tag{2}$$

Mit (1) sieht man unmittelbar, dass  $p \mid B$ ,  $p^2 \nmid B$  und  $p \nmid a_k$  für  $k \leq m$ ,  $k \neq i$ . Daraus und aus der Definition der Zahlen  $A_k$  folgt  $p \mid A_k$  für  $k \leq m$ ,  $k \neq i$  und  $p \nmid A_i$ . Infolgedessen

$$p \nmid A. \tag{3}$$

Falls  $S_m$  eine ganze Zahl wäre, dann würde  $p \mid A$  aus (2) und  $p \mid B$  folgen. Das steht aber im Widerspruch zu (3).

Eine leichte Folgerung aus Satz 1 ist

**Satz 2.** Haben  $a_1 < a_2 < \dots$  und  $P(x)$  die vorige Bedeutung und ist

$$\liminf_{x \rightarrow \infty} \frac{P(x)}{P\left(\frac{x}{2}\right)} > 1, \tag{4}$$

dann existiert ein  $m_0$  derart, dass keine der Partialsummen  $S_m = \sum_{k=1}^m 1/a_k$  ( $m \geq m_0$ ) der Reihe  $\sum_{k=1}^{\infty} 1/a_k$  ganz ist.

*Beweis.* Es genügt festzustellen, dass aus (4) die Unendlichkeit der Folge  $a_1 < a_2 < \dots$  folgt. Alles übrige ist klar.

Satz 2 ermöglicht uns eine Aussage über die Nicht-Ganzheit der Partialsummen einiger Ahmesschen Reihen.

**Satz 3.** Haben  $a_1 < a_2 < \dots$  und  $P(x)$  die vorige Bedeutung und existieren zwei Konstanten  $c, \alpha$  derart, dass  $c > 0$ ,  $\alpha \geq 0$  und

$$P(x) \sim \frac{c x}{\log^\alpha x} \tag{5}$$

gilt, dann existiert ein  $m_0$ , so dass keine der Partialsummen  $S_m = \sum_{k=1}^m 1/a_k$  ( $m \geq m_0$ ) der Reihe  $\sum_{k=1}^{\infty} 1/a_k$  ganz ist.

*Beweis.* Die Unendlichkeit der Folge  $a_1 < a_2 < \dots$  folgt aus (5). Durch eine leichte Rechnung bekommt man

$$\frac{P(x)}{P\left(\frac{x}{2}\right)} \sim 2 \left( \frac{\log x - \log 2}{\log x} \right)^\alpha \rightarrow 2.$$

Satz 3 folgt nun aus Satz 2.

<sup>1)</sup>  $f(x) \sim g(x)$  bedeutet  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 1$ .

Mit Hilfe von Satz 3 beweisen wir jetzt den folgenden Satz, welcher eine Erweiterung des oben erwähnten Ergebnisses aus [1] darstellt.

**Satz 4.** Es seien  $a, d$  natürliche Zahlen. Dann existiert ein  $m_0$  derart, dass keine der Partialsummen  $S_m = \sum_{k=1}^m 1/(a + (k-1)d)$  ( $m \geq m_0$ ) der Reihe  $\sum_{k=1}^{\infty} 1/(a + (k-1)d)$  ganz ist.

*Beweis.* Es sei  $\delta$  der grösste gemeinsame Teiler von  $a, d$ . In  $a = a'\delta, d = d'\delta$  sind die Zahlen  $a', d'$  teilerfremd. Nun setzen wir  $a_k = a' + (k-1)d'$  ( $k = 1, 2, \dots$ ).  $P(x)$  bezeichne wieder die Anzahl aller Primzahlen  $p \leq x$ , welche in der Folge  $\{a_k\}_{k=1}^{\infty}$  enthalten sind. Bekanntlich ist

$$P(x) \sim \frac{x}{\varphi(d') \log x},$$

wo  $\varphi$  die Eulersche Funktion bezeichnet (siehe [3], S. 130).

Auf Grund von Satz 3 existiert ein  $m_0$ , so dass keine der Summen  $S'_m = \sum_{k=1}^m 1/(a' + (k-1)d')$  ( $m \geq m_0$ ) ganz ist. Die Behauptung des Satzes folgt nun unmittelbar aus  $S_m = (1/\delta) S'_m$ .

Die Tatsache, dass keine der Partialsummen  $\sum_{k=1}^m 1/k$  ( $m > 1$ ) der harmonischen Reihe ganz ist, führt zur Frage, ob eine analoge Aussage auch für die Reihen  $\sum_{k=1}^{\infty} 1/a_k$  gilt, wobei  $\{a_k\}_{k=1}^{\infty}$  eine arithmetische Folge (natürlicher Zahlen) ist.

TIBOR ŠALÁT, Bratislava, ČSSR

#### LITERATUR

- [1] W. SIERPIŃSKI, *Elementary Theory of Numbers* (Warszawa 1964).  
 [2] P. ERDŐS, G. STRAUS, *On the Irrationality of Certain Ahmes Series*, J. Indian Math. Soc. 27, 129–133 (1963).  
 [3] K. PRACHAR, *Primzahlverteilung* (russische Übersetzung) (Moskau 1967).

### Über verschwindende Summen von Einheitswurzeln

Für die Untersuchung schlichter Komplexzerlegungen endlicher abelscher Gruppen beweist L. RÉDEI ([1], S. 361) folgenden Satz, der auch an sich von Interesse ist:

**Satz.** Für jede natürliche Zahl  $n > 1$  ist die Gliederzahl einer verschwindenden (nichtleeren) Summe  $n$ -ter (nicht notwendig verschiedener) komplexer Einheitswurzeln nicht kleiner als der kleinste Primteiler von  $n$ .

Der RÉDEISCHE Beweis dieses Satzes läuft über eine Reihe von Summationsumformungen und Fallunterscheidungen und ist «unerwartet mühsam».

Im folgenden geben wir einen sehr einfachen algebraischen Beweis für den schärferen **Satz\***. Ist  $p$  der kleinste Primteiler der natürlichen Zahl  $n > 1$ , so sind weniger als  $p$  paarweise verschiedene komplexe  $n$ -te Einheitswurzeln über dem Körper  $K$  der rationalen Zahlen stets linear unabhängig.

*Beweis:* Wir erinnern zunächst an einige einfache Resultate der Theorie der Kreisteilungskörper (vgl. VAN DER WAERDEN [2], § 42, § 60). Für  $m > 1$  bezeichne dazu  $K_m$  den  $m$ -ten Kreisteilungskörper und  $\zeta_m$  eine primitive  $m$ -te Einheitswurzel über  $K$ . Ist  $q$  eine Primzahl und  $m = qt$ , so gilt für den Grad  $|K_m : K_t|$  von  $K_m$  über  $K_t$

$$|K_m : K_t| = \begin{cases} q, & \text{falls } q|t \\ q-1, & \text{falls } q \nmid t. \end{cases}$$

Für  $q|t$  ist die Menge  $\mathcal{M} = \{1, \zeta_m, \dots, \zeta_m^{q-1}\}$  eine Basis von  $K_m$  über  $K_t$ ; für  $q \nmid t$  erhält man Basen von  $K_m$  über  $K_t$ , wenn man aus  $\mathcal{M}$  jeweils ein Element herausnimmt.

Den Beweis des Satzes führen wir nun durch vollständige Induktion über die Teiler von  $n$ .

Ist  $m$  ein Primteiler von  $n$ , so gilt nach Voraussetzung  $p \leq m$  und nach der Vorbemerkung sind sogar je  $m - 1$  paarweise verschiedene  $m$ -te Einheitswurzeln über  $K$  linear unabhängig. Damit ist der Induktionsbeginn erledigt.

Wir nehmen nun an, dass der Satz für alle echten Teiler von  $n$  richtig sei und setzen  $t = n/p$ . Wäre nun  $r \leq p - 1$  und wären  $\xi_1, \dots, \xi_r$  paarweise verschiedene linear abhängige  $n$ -te Einheitswurzeln über  $K$ , so hätte man eine Gleichung

$$a_1 \xi_1 + \dots + a_i \xi_i + \dots + a_r \xi_r = 0, \tag{1}$$

in der die  $a_i$  rationale Zahlen sind, die wir o. B. d. A. als von Null verschieden annehmen dürfen. Jedes  $\xi_i$  lässt sich in der Form

$$\xi_i = \eta_i \zeta_n^{f_i} \tag{2}$$

darstellen, wo  $\eta_i \in K_t$  und  $0 \leq f_i \leq p - 1$  ist. Wir können daher (1) durch geeignete Zusammenfassung überführen in

$$S_0 + S_1 \zeta_n + \dots + S_{p-1} \zeta_n^{p-1} = 0. \tag{3}$$

Hierbei sind die  $S_j$  entweder leer oder Linearkombinationen  $t$ -ter Einheitswurzeln. Natürlich sind nicht alle  $S_j$  leer.

Wegen  $r \leq p - 1$  ist mindestens ein  $S_j$  leer. Von den Elementen  $1, \zeta_n, \dots, \zeta_n^{p-1}$  treten daher in (3) höchstens  $p - 1$  Elemente auf. Diese sind aber über  $K_t$  linear unabhängig; mithin müssen in (3) die nichtleeren  $S_j$  verschwinden.

Aus (2) ist nun ersichtlich, dass die nichtleeren  $S_j$  Linearkombinationen paarweise verschiedener  $t$ -ter Einheitswurzeln sind. Natürlich treten in keinem solchen  $S_j$  mehr als  $r$  Glieder auf, und das ist ein Widerspruch zur Induktionsannahme. Die  $\xi_1, \dots, \xi_r$  sind also entgegen unserer Annahme linear unabhängig. E. WITTMANN, Erlangen

LITERATUR

- [1] L. RÉDEI, *Die neue Theorie der endlichen abelschen Gruppen und Verallgemeinerung des Hauptsatzes von Hajós*, Acta math. Acad. Sci. Hung. XVI, 329–373 (1965).
- [2] B. L. VAN DER WAERDEN, *Algebra I*, 7. Auflage (Springer 1966).

## Aufgaben

**Aufgabe 618.** Ist für jede Primzahl  $p > 2$   $\eta(p)$  die kleinste natürliche Zahl  $k$  mit  $2^k \equiv 1 \pmod{p}$ ,  $E(r)$  für  $r \geq 2$  die Anzahl der Primzahlen  $p$  mit  $\eta(p) = r$  und  $A(x, \delta)$  für  $0 < \delta < 1$  die Anzahl aller Primzahlen  $p$  mit  $p \leq x$  und  $\eta(p) > p^\delta$ , so gilt:

$$E(r) \leq \ln 2 \cdot \frac{r}{\ln r} \quad (r \geq 2), \quad A(x, \delta) = \frac{x}{\ln x} + o\left(\frac{x}{\ln x}\right) \quad \left(0 < \delta < \frac{1}{2}\right)$$

und

$$A\left(x, \frac{1}{2}\right) \geq (1 - \ln 2) \cdot \frac{x}{\ln x} + o\left(\frac{x}{\ln x}\right) \quad (x \rightarrow \infty).$$

Man beweise diese Behauptungen.

G. Jaeschke, Sindelfingen