

ÜBER DIE VERTEILUNG DER B-ELEMENTE IN EINEM POLYNOMRING ÜBER EINEM ENDLICHEN KÖRPER

R. Wagner (Paderborn, Deutschland)

*Herrn Professor Karl-Heinz Indlekofer
zum 50. Geburtstag gewidmet*

Abstract. The purpose of this short note is to describe the distribution of B-elements (i.e. of elements, which are sums of two squares) in the polynomial ring $F_q[x]$ over a finite field F_q . In the case $q \equiv 3 \pmod{4}$ the number of representations as sum of two squares is also regarded. Some of the results are very similar to those known about the B-numbers in \mathbb{N} .

1. Zunächst sollen einige wohlbekannte Ergebnisse aus der Algebra zusammengestellt werden, die hier, um eine geschlossene Darstellung zu erreichen, ohne Beweis gebracht werden.

- (1) *Ein Element a in einem Ring R heißt B-Element, wenn es $b, c \in R$ mit $a = b^2 + c^2$ gibt.*
- (2) *Das Produkt von B-Elementen ist wieder ein B-Element.*
- (3) *In einem kommutativen Ring R mit 1 , in dem 2 invertierbar ist und in dem es ein $\varepsilon \in R$ mit $\varepsilon^2 = -1$ gibt, ist jedes Element B-Element.*
- (4) *In F_q (F_q endlicher Körper mit $q = p^m$ vielen Elementen, $p \neq 2$ Primzahl) ist jedes von 0 verschiedene Element B-Element.¹*
- (5) *In F_q (q ungerade) ist -1 genau dann ein Quadrat, wenn $q \equiv 1 \pmod{4}$ ist.*

Bemerkung. Die Aussage (5) hat zur Folge, daß in $F_q[x]$ für $q \equiv 1 \pmod{4}$ jedes Element B-Element ist, ein für statistische Betrachtungen uninteressanter

¹ Für $p = 2$ ist in F_q jedes Element sogar Quadrat.

Fall. ² Für die Anzahl der Darstellungen ergibt sich im Falle $q \equiv 1 \pmod{4}$: 0 hat unendlich viele Darstellungen als Summe von zwei Quadraten in $F_q[x]$, ein von 0 verschiedenes Element f hat $\frac{T(f)}{4}$ viele Darstellungen als Summe von zwei Quadraten in $F_q[x]$, wobei mit $T(f)$ die Anzahl der verschiedenen Teiler von f bezeichnet wird.³ Im Fall $q = 2^m$ hat man in jedem Fall unendlich viele Darstellungen.

2. Wir wollen uns nun ausschließlich mit dem Fall $q \equiv 3 \pmod{4}$ befassen. Zunächst benötigen wir ein Analogon des Lemmas von Thue:

- (6) *Es sei $f, g \in F_q[x]$, $q \equiv 3 \pmod{4}$ mit $f, g \neq 0$. Es sei $n = \delta(g)$ (δ Grad), und f und g seien teilerfremd. Dann gibt es $r, s \in F_q[x]$ mit $r, s \neq 0$ und $\delta(r) \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$, $\delta(s) \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ ($\lfloor \ \rfloor$ Gaußklammer), so daß $rf - s = wg$ mit geeignetem $w \in F_q[x]$ ist.*

Beweis. Allgemein bezeichne $\langle h \rangle_g$ den Rest von $h \in F_q[x]$ bei der Division durch g . Es sei $N_t = \{h \in F_q[x] \mid \delta(h) \leq t\}$. Dann gilt $\#(N_t) = q^{t+1}$. Wir definieren $\Phi : N_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \times N_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \rightarrow N_{n-1}$ durch $\Phi(\rho, \sigma) := \langle \rho f - \sigma \rangle_g$. Φ ist nicht injektiv, denn

$$\#(N_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \times N_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}) = q^{2(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1)} \geq q^{n+1} > q^n = \#(N_{n-1}).$$

Aus $\Phi(\rho_1, \sigma_1) = \Phi(\rho_2, \sigma_2)$ folgt mit $r = \rho_1 - \rho_2$, $s = \sigma_1 - \sigma_2$ offenbar $\langle rf - s \rangle_g = 0$.

Es kann dabei nicht 0 sein, denn sonst wäre s gleich 0. Es kann auch nicht $s = 0$ sein; sonst wäre $rf = wg$, und wegen $\delta(r) < \delta(g)$ würden f und g nicht teilerfremd sein.

Unmittelbar aus (6) folgt nun eine Charakterisierung der exakten Primpotenzteiler der B-Elemente in $F_q[x]$, $q \equiv 3 \pmod{4}$.

² Für $q = 2^m$ gilt: Die B-Elemente sind gerade die Polynome der Form

$$\sum_{k=0}^n a_{2k} x^{2k}.$$

³ $f = w_1 + w_2$ (w_1, w_2 Quadrate) und $f = w_2 + w_1$ sollen dabei als verschiedene Darstellungen angesehen werden, wenn $w_1, w_2 \neq 0$ und $w_1 \neq w_2$ ist. Dagegen soll $f = 0 + w$, $f = w + 0$, (w Quadrat) nur als eine Möglichkeit gezählt werden.

- (7) In $F_q[x]$, $q \equiv 3 \pmod{4}$, gilt: Wenn ein Primelement g ein B-Element f , $f \neq 0$, teilt, so ist g B-Element oder $g^{2m} \parallel f$.

Beweis. Nehmen wir an, daß $g^m \parallel f$ und m ungerade ist. Es gelte $f = u^2 + v^2$. Dabei ist $u, v \neq 0$, da sonst f Quadrat ist. Es gelte $g^r \parallel u$ und $g^s \parallel v$; dann ist auch $h = \frac{f}{g^{\min(2r, 2s)}}$ ein B-Element, und es gilt $h = \tilde{u}^2 + \tilde{v}^2$ mit $\langle h \rangle_g = 0$. Dabei ist $\langle \tilde{u} \rangle_g \neq 0$ oder $\langle \tilde{v} \rangle_g \neq 0$. Falls $\langle \tilde{v} \rangle_g \neq 0$ ist, folgt $\langle -1 \rangle_g = \frac{(\langle \tilde{u} \rangle_g)^2}{(\langle \tilde{v} \rangle_g)^2}$.

Nach dem Analogon des Lemmas von Thue folgt dann für ε mit $(\langle \varepsilon \rangle_g)^2 = \langle -1 \rangle_g$: Es gibt $r, s \in F_q[x] \setminus \{0\}$ mit $\delta(r) \leq \left\lfloor \frac{\delta(g)}{2} \right\rfloor$, $\delta(s) \leq \left\lfloor \frac{\delta(g)}{2} \right\rfloor$ und mit $\langle r\varepsilon - s \rangle_g = \langle 0 \rangle_g$. Dies impliziert $\langle r\varepsilon + s \rangle_g \cdot \langle -r\varepsilon + s \rangle_g = \langle r^2 + s^2 \rangle_g = \langle 0 \rangle_g$. Somit erhält man $r^2 + s^2 = wg$. Wegen $\delta(r^2 + s^2) \leq n$ gilt dann $w \in F_q \setminus \{0\}$ und $g = \frac{1}{w}(r^2 + s^2)$. Da $\frac{1}{w}$ B-Element ist, ist auch g B-Element.

Wir kommen nun zur Charakterisierung der B-Primelemente.

- (8) In $F_q[x]$ mit $q \equiv 3 \pmod{4}$ sind die Primelemente g mit geradem $\delta(g)$ die B-Primelemente.

Beweis. Zunächst ist klar, daß der grad jedes B-Elementes f durch 2 teilbar ist. Dies sieht man für $f = u^2 + v^2$ mit $\delta(u) \neq \delta(v)$ sofort ein. Im Falle $f = u^2 + v^2$ mit $\delta(u) = \delta(v) = n$ erhält man $\delta(f) = 2n$, da der formale Koeffizient bei x^{2n} als Summe von zwei nicht verschwindenden Quadraten $\neq 0$ ist.

Sei g Primelement mit $\delta(g) = 2n$. Dann ist $\text{ord}((F_q[x]/g \cdot F_q[x]) \setminus \{0\}, \cdot) = q^{2n} - 1$ durch 4 teilbar. Damit gibt es, da $F_q[x]/g \cdot F_q[x] \setminus \{0\}$ zyklisch ist, ein $\varepsilon \in F_q[x]$ mit $(\langle \varepsilon \rangle_g)^2 = \langle -1 \rangle_g$.

Hieraus folgt wie beim Beweis von (7), daß g B-Element ist. Wir betrachten nun die arithmetische Halbgruppe G (siehe Knopfmacher [3]) der Elemente f in $F_q[x]$ mit höchstem Koeffizienten 1.

- (9) Jedes B-Element in G hat die Darstellung $f = g_1^{t_1} \dots g_k^{t_k} h_1^{s_1} \dots h_l^{s_l}$ mit $g_1, \dots, g_k, h_1, \dots, h_l \in G$, wobei g_1, \dots, g_k verschiedene B-Primelemente und h_1, \dots, h_l verschiedene Primelemente sind, die nicht B-Elemente sind, und s_1, \dots, s_l gerade natürliche Zahlen bezeichnen. (Die Darstellung ist bis auf die Reihenfolge der Faktoren eindeutig.)

Beweis. Die Möglichkeit für die beschriebene Darstellung ergibt sich daraus, daß in $F_q \setminus \{0\}$ jedes Element B-Element ist.

- (10) Für die Anzahl ρ der verschiedenen Darstellungen als Summe von zwei Quadraten⁴ erhält man, wenn f eine Primfaktorzerlegung der Form aus (9) hat,

$$\rho(f) = \rho(1) \cdot (t_1 + 1) \dots (t_k + 1).$$

Beweis. Setzt man $\varepsilon := \sqrt{-1}$, und $g_j = (a_j + \varepsilon b_j)(a_j - \varepsilon b_j)$, so hat f in $F_q(\varepsilon)[x]$ die Primfaktorzerlegung

$$f = (a_1 + \varepsilon b_1)^{t_1} (a_1 - \varepsilon b_1)^{t_1} \dots (a_k + \varepsilon b_k)^{t_k} (a_k - \varepsilon b_k)^{t_k} h_1^{s_1} \dots h_l^{s_l}.$$

Wie im Fall der natürlichen Zahlen erhält man aus $f = a^2 + b^2$ sofort $f = (a + \varepsilon b) \cdot (a - \varepsilon b)$. Je vier Elemente der Form $a + \varepsilon b$ führen dabei zur selben Darstellung $f = a^2 + b^2$. $a + \varepsilon b$ ist dann von der Form

$$u \cdot (a_1 + \varepsilon b_1)^{m_1} (a_1 - \varepsilon b_1)^{t_1 - m_1} \dots (a_k + \varepsilon b_k)^{m_k} (a_k - \varepsilon b_k)^{t_k - m_k} \cdot h_1^{s_1/2} \dots h_l^{s_l/2}$$

mit $u \in F_q(\varepsilon) \setminus \{0\}$ und $0 \leq m_i \leq t_i$. Für u hat man $4\rho(1)$ viele Möglichkeiten, für die Wahl der m_i je $t_i + 1$ Möglichkeiten, woraus sich insgesamt die behauptete Formel ergibt.

3. Es sei b die charakteristische Funktion der B-Zahlen. Es sei $r = \frac{\rho}{\rho(1)}$. b und r sind auf G im Falle $q \equiv 3 \pmod{4}$ multiplikative Funktionen.

Wir betrachten zunächst b . Es sein $B(n) := \sum_{\substack{a \in G \\ \delta(a)=n}} b(a)$ und $B^\dagger(y) := \sum_{n=0}^{\infty} B(n)y^n$. B^\dagger ist für $|y| < \frac{1}{q}$ analytisch, und man hat für $|y| < \frac{1}{q}$ die Produktdarstellung⁵

$$\begin{aligned} B^\dagger(y) &= \prod_{\substack{p \in \mathbf{P} \\ \delta(p) \text{ gerade}}} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} y^{k\delta(p)} \right) \cdot \prod_{\substack{p \in \mathbf{P} \\ \delta(p) \text{ ungerade}}} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} y^{2k\delta(p)} \right) = \\ &= \prod_{l=1}^{\infty} \frac{1}{(1 - y^{2l})^{P(2l)}} \cdot \prod_{\substack{l=1 \\ l \text{ ungerade}}}^{\infty} \frac{1}{(1 - y^{2l})^{P(l)}}. \end{aligned}$$

⁴ Die Verschiedenheit der Darstellung soll hier wie in Fußnote 3 definiert sein.

⁵ \mathbf{P} Menge der Primelemente, $P(n)$ Anzahl der Primelemente vom Grade n .

Logarithmierung ergibt

$$\begin{aligned}\log B^{\mathfrak{f}}(y) &= \sum_{l=1}^{\infty} (-P(2l)) \log(1 - y^{2l}) + \sum_{l \text{ ungerade}} (-P(l)) \log(1 - y^{2l}) = \\ &= \sum_{l=1}^{\infty} P(2l) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y^{2lk}}{k} + \sum_{l \text{ ungerade}} P(l) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{y^{2lk}}{k}.\end{aligned}$$

Ordnet man nach Potenzen von y , so erhält man

$$\begin{aligned}\log B^{\mathfrak{f}}(y) &= \sum_{n \text{ gerade}} \left(\left(\sum_{\substack{d|n \\ d \text{ gerade}}} \frac{P(d)d}{n} \right) + \left(\sum_{\substack{d|n \\ d \text{ ungerade}}} \frac{2 \cdot P(d)d}{n} \right) \right) y^n = \\ &= \sum_{n \text{ gerade}} \left(\sum_{d|n} \frac{P(d)d}{n} \right) y^n + \sum_{n \text{ gerade}} \left(\sum_{\substack{d|n \\ d \text{ ungerade}}} \frac{P(d)d}{n} \right) y^n.\end{aligned}$$

Vergleicht man dies mit der entsprechenden Rechnung für die 1-Funktion, deren erzeugende Funktion die ζ -Funktion ist (siehe Knopfmacher [3]), so erhält man

$$\sum_{d|n} P(d)d = G(n) = \#\{a \in G \mid \delta(a) = n\} = q^n.$$

Man erhält also

$$\begin{aligned}\log B^{\mathfrak{f}}(y) &= \sum_{n \text{ gerade}} \frac{q^n y^n}{n} + \sum_{n \text{ gerade}} \left(\sum_{\substack{d|n \\ d \text{ ungerade}}} \frac{P(d)d}{n} \right) y^n = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(q^2 y^2)^m}{m} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2^l} \sum_{m \text{ ungerade}} \sum_{d|m} \frac{P(d)d}{m} (y^{2^l})^m = \\ &= \frac{1}{2} \log \left(\frac{1}{1 - q^2 y^2} \right) + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2^l} \sum_{m \text{ ungerade}} \frac{q^m}{m} (y^{2^l})^m = \\ &= \frac{1}{2} \log \left(\frac{1}{1 - q^2 y^2} \right) + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2^{l+1}} \log \left(\frac{1 + q y^{2^l}}{1 - q y^{2^l}} \right).\end{aligned}$$

Damit ergibt sich

$$B^{\mathfrak{f}}(y) = \underbrace{(1 - q^2 y^2)^{-\frac{1}{2}}}_{H_q(y)} \cdot \underbrace{\prod_{l=1}^{\infty} \left(\frac{1 + q y^{2^l}}{1 - q y^{2^l}} \right)^{\frac{1}{2^{l+1}}}}_{N_q(y)}$$

Der Term $N_q(y)$ stellt für $|y| < \frac{1}{\sqrt{q}}$ eine holomorphe Funktion dar. Sowohl H_q als auch N_q sind gerade. Es sei nun $N_q(y) = \sum_{k=0}^{\infty} d_{2k} y^{2k}$. Dann gilt $|d_{2k}| \leq c_\varepsilon q^{(1+\varepsilon)k}$ mit beliebigen $\varepsilon > 0$ und geeigneten $c_\varepsilon > 0$, und es folgt mit $c_k := \frac{d_{2k}}{q^k}$

$$B(2m) = \sum_{k=0}^m \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} q^{2m-2k} q^k c_k.$$

Wir formen um

$$B(2m) = q^{2m} \frac{1}{\sqrt{2m}} \left(\sum_{k=0}^{m-1} \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} q^{-k} c_k \sqrt{2m-2k} \sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} + c_m \sqrt{2mq^{-m}} \right)$$

und schätzen den Term

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{m-1} \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} q^{-k} c_k \sqrt{2m-2k} \sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} + \\ & + c_m \sqrt{2mq^{-m}} - \sum_{k=0}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} c_k q^{-k} \end{aligned}$$

ab. Es gilt

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{k=0}^{m-1} \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} q^{-k} c_k \sqrt{2m-2k} \sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} + \right. \\ & \qquad \qquad \qquad \left. + c_m \sqrt{2mq^{-m}} - \sum_{k=0}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} c_k q^{-k} \right| \leq \\ & \leq \underbrace{\left| \sum_{k=0}^{\lfloor m^\alpha \rfloor} \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} \sqrt{2m-2k} \sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} c_k q^{-k} - \sum_{k=0}^{\lfloor m^\alpha \rfloor} \sqrt{\frac{2}{\pi}} c_k q^{-k} \right|}_{\text{Term I}} + \\ & + \underbrace{\left| \sum_{k=\lfloor m^\alpha \rfloor+1}^{m-1} \binom{-\frac{1}{2}}{m-k} (-1)^{m-k} \sqrt{2m-2k} \sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} c_k q^{-k} \right|}_{\text{Term II}} + \\ & + \underbrace{\left| c_m \sqrt{2mq^{-m}} \right|}_{\text{Term III}} + \underbrace{\left| \sum_{k=\lfloor m^\alpha \rfloor+1}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} c_k q^{-k} \right|}_{\text{Term IV}} \end{aligned}$$

(hierbei kann $\alpha \in (0, 1)$ beliebig gewählt werden).

Die restlichen Abschätzungen beruhen auf der Tatsache, daß

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \binom{-\frac{1}{2}}{n} \sqrt{2n} (-1)^n = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$$

ist; genauer gilt wegen $\frac{1^2 \dots (2n-1)^2}{2^2 \dots (2n)^2} \cdot 2n = \frac{\pi}{2} + O\left(\frac{1}{n}\right)$ auch

$$\binom{-\frac{1}{2}}{n} (-1)^n \sqrt{2n} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} + O\left(\frac{1}{n}\right).$$

Wegen $\sqrt{\frac{2m}{2m-2k}} = 1 + O\left(\frac{1}{m^{1-\alpha}}\right)$ für $k \leq [m^\alpha]$ erhält man

$$\text{Term I} = O\left(\frac{1}{m^{1-\alpha}}\right).$$

Weiter gilt

$$\text{Term II} = O\left(\sqrt{m} \cdot \sum_{k=[n^\alpha]+1}^{m-1} c_k q^{-k}\right) = O\left(\sqrt{m} q^{(-1+\epsilon)[m^\alpha]}\right) = O\left(\frac{1}{m^{1-\alpha}}\right)$$

und

$$\text{Term III} = O\left(\frac{1}{m^{1-\alpha}}\right) \quad \text{und} \quad \text{Term IV} = O\left(\frac{1}{m^{1-\alpha}}\right).$$

Insgesamt erhält man im Falle $q \equiv 3 \pmod{4}$ die Asymptotik:

$$(11) \quad B(2m) = \frac{q^{2m}}{\sqrt{2m}} N_q\left(\frac{1}{q}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(1 + O\left(\frac{1}{m^\beta}\right)\right), \quad \text{wobei } \beta \in (0, 1) \text{ beliebig gewählt werden kann.}$$

Bemerkenswert ist hierbei $\lim_{\substack{q \rightarrow \infty \\ q \equiv 3 \pmod{4}}} N_q\left(\frac{1}{q}\right) = 1$.

(12) *Es sei R^\sharp die erzeugende Funktion von r mit $R^\sharp(y) = \sum_{m=1}^{\infty} R(m)y^m$.⁶ Dann gilt $R(2m+1) = 0$ und $R(2m) = q^{2m}$.⁷*

⁶ $R(m) = \sum_{\delta(a)=m} r(a)$.

⁷ Der Beweis kann vom Leser leicht nachvollzogen werden.

Literatur

- [1] **Hardy H. and Wright E.M.**, *An introduction to the theory of numbers*, 5th ed., Clarendon Press, Oxford, 1979.
- [2] **Indlekofer K.-H.**, The abstract prime number theorem for function fields, *Acta Math.Hung.*, **62** (1-2) (1993), 137-148.
- [3] **Knopfmacher J.**, *Analytic arithmetic of algebraic function fields*, *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics Vol. 50*, Marel Rekker, New York, 1979.

R. Wagner

Universität-GH Paderborn FB 17

Warburger Str. 100.

D-33098 Paderborn, BRD