

Korrektheit Faktorbasen-Faktorisierung

Korrektheit: Es gilt

$$\begin{aligned}x^2 &\equiv \prod_{i=1}^{s+1} (x_i^2)^{f_i} \equiv \prod_{i=1}^{s+1} z_i^{f_i} = \prod_{i=1}^{s+1} \prod_{j=1}^s p_j^{f_i e_{i,j}} \\ &= \prod_{j=1}^s p_j^{\sum_{i=1}^{s+1} f_i e_{i,j}} \equiv y^2 \pmod{n}.\end{aligned}$$

Wahl der Faktorbasis:

- Wahl eines kleinen b führt zu kleiner Anzahl Iterationen von Schritt 3, allerdings auch zu einer kleinen Ws b -glatter z_i in Schritt 3.1.
- Analyse der Dichte von b -glatten Zahlen führt zur optimalen Wahl
$$b = \exp \frac{1}{2} \sqrt{\ln n \ln \ln n}.$$
- Wir integrieren bei der Fermat-Faktorisierung mit $z_i = x_i^2 - n$ nur solche $p \in B$ in der Faktorbasis, bei denen $\left(\frac{n}{p}\right) = 1$ gilt.
- Sei p ein Teiler von z_i . Wegen $z_i = x_i^2 - n$ folgt $x_i^2 \equiv n \pmod{p}$.
- D.h. n muss ein quadratischer Rest modulo p sein.

Ziel: Wähle x_i so, dass $z_i \equiv x_i^2 \pmod{n}$ mit großer Ws b -glatt ist. Für

$$x_i = \lceil \sqrt{n} \rceil + i \text{ gilt } z_i \approx 2i\sqrt{n}.$$

Kettenbruch Faktorisierung von Morrison-Brillhart

Idee der Kettenbruch Faktorisierung:

- Berechne den Kettenbruch von \sqrt{n} mit Näherungsbrüchen $\frac{p_i}{q_i}$.
- Wähle $z_i := p_i^2 - nq_i^2$. Insbesondere gilt dann $z_i \equiv p_i^2 \equiv x_i^2 \pmod{n}$.

Lemma

Sei $n \in \mathbb{N}$ kein Quadrat und $\frac{p_i}{q_i}$ Näherungsbruch von \sqrt{n} . Dann gilt

$$|p_i^2 - nq_i^2| < 2\sqrt{n}.$$

Beweis: Für Näherungsbrüche gilt $|\sqrt{n} - \frac{p_i}{q_i}| \leq \frac{1}{q_i q_{i+1}}$. Es folgt

$$\begin{aligned} |p_i^2 - nq_i^2| &= q_i^2 |n - (\frac{p_i}{q_i})^2| = q_i^2 |\sqrt{n} - \frac{p_i}{q_i}| \cdot |2\sqrt{n} + \frac{p_i}{q_i} - \sqrt{n}| \\ &\leq \frac{q_i}{q_{i+1}} (2\sqrt{n} + \frac{1}{q_i q_{i+1}}) \end{aligned}$$

- Die Behauptung folgt mittels $q_{i+1} \geq q_i + 1$ aus

$$\begin{aligned} |p_i^2 - nq_i^2| - 2\sqrt{n} &\leq 2\sqrt{n} \left(\frac{q_i}{q_{i+1}} + \frac{1}{2\sqrt{n}q_{i+1}^2} - 1 \right) \\ &< 2\sqrt{n} \left(\frac{q_i}{q_{i+1}} + \frac{1}{q_{i+1}} - 1 \right) \leq 0. \end{aligned}$$

Faktorbasis bei Morrison-Brillhart:

- Wir wählen wiederum nur solche $p \in B$ mit $\left(\frac{n}{p}\right) = 1$.
- Sei p ein Primteiler von $z_i = p_i^2 - nq_i^2$.
- Aus $z_i = p_i^2 - nq_i^2$ folgt daher $\left(\frac{p_i}{q_i}\right)^2 \equiv n \pmod{p}$, falls $q_i \in U_p$.
- Damit ist n ein quadratischer Rest modulo p .
- Annahme: $q_i \notin U_p$, d.h. $p|q_i$.
- Aus $p|z_i$ und $p|q_i$ folgt $p|z_i + nq_i^2$.
- Damit gilt $p|p_i$ und $\text{ggT}(p_i, q_i) \geq p$. (Widerspruch: $\text{ggT}(p_i, q_i) = 1$)

Bsp. Morrison-Brillhart Faktorisierung

Bsp: Wir faktorisieren $n = 133 = 7 \cdot 19$.

- Wir wählen $b = 5$ als Glattheitsschranke. Es gilt

$$\left(\frac{133}{2}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) = 1, \left(\frac{133}{3}\right) = \left(\frac{1}{3}\right) = 1 \text{ und } \left(\frac{133}{5}\right) = \left(\frac{3}{5}\right) = (-1).$$

- D.h. wir wählen die Faktorbasis $B = \{-1, 2, 3\}$.
- Der Kettenbruchalgorithmus liefert

$$\sqrt{133} = [11, 1, 1, 7, 5, 1, 1, 1, 2, 1, 1].$$

- Die ersten Näherungsbrüche sind damit $11, 12, \frac{23}{2}, \frac{173}{15}, \frac{888}{77}, \frac{1061}{92}$.
- Unser Algorithmus FAKTORBASIS liefert uns folgende Relationen.

$x_i \equiv p_i \pmod n$	$z_i = p_i^2 - nq_i^2$	e_i	$e_i \pmod 2$
11	$-12 = (-1) \cdot 2^2 \cdot 3$	$(1, 2, 1)$	$(1, 0, 1)$
12	11		
23	$-3 = (-1) \cdot 3$	$(1, 0, 1)$	$(1, 0, 1)$
40	$4 = 2^2$	$(0, 2, 0)$	$(0, 0, 0)$
90	-13		
130	$9 = 3^2$	$(0, 0, 2)$	$(0, 0, 0)$

Bsp. Morrison-Brillhart Faktorisierung

- Die letzte Relation liefert

$$130^2 \equiv 3^2 \pmod{133}.$$

- Allerdings gilt $130 \equiv -3 \pmod{133}$. D.h. die Relation ist nutzlos.
- Die ersten beiden Relationen sind linear abhängig und liefern

$$(11 \cdot 23)^2 \equiv 120^2 \equiv ((-1)^1 2^1 3^1)^2 = (-6)^2 \pmod{133}.$$

- Es gilt $120 \not\equiv \pm 6 \pmod{133}$ und damit

$$\text{ggT}(120 \pm 6, 133) = \text{ggT}(-13 \pm 6, 133) = \{7, 19\}.$$

- Ebenso erhält man die Faktorisierung aus der 3. Relation

$$40^2 \equiv 2^2 \pmod{133}.$$

Anmerkung:

- Oft liefern die Näherungsbrüche nicht genügend viele Relationen.
- Hier betrachtet man zusätzlich die Kettenbrüche von

$$\sqrt{kn} \text{ für kleine } k \in \mathbb{N}.$$

- Vorsicht:* In diesem Fall kann man nur Primzahlen p mit $\left(\frac{kn}{p}\right) = (-1)$ für alle k in der Faktorbasis ausschließen.

Quadratisches Sieb

Idee: Statt Teilbarkeit für die z_i sukzessive zu testen, berechne für viele z_i gleichzeitig die Teilbarkeit durch $p_i^{e_i}$ mit $p_i \in B$.

Prinzip des Siebens:

- Im Fermat Algorithmus ist $z_i := x_i^2 - n$ durch p teilbar gdw
$$x^2 \equiv n \pmod{p}.$$
- D.h. wir berechnen die Lösungen $\pm x_p$ dieser Kongruenz.
- Diese Lösungen existieren, da $\left(\frac{n}{p}\right) = 1$ für alle $p \in B$.
- Damit sind genau diejenigen z_i mit $x_i \equiv \pm x_p \pmod{p}$ durch p teilbar.
- Diese z_i werden durch p dividiert.
- Analog verfährt man für die Primpotenzen. D.h. wir berechnen Lösungen von $x^2 \equiv n \pmod{p^r}$ für hinreichend großes r .
(Einen Algorithmus dafür werden wir später kennenlernen.)
- Durch sukzessives Dividieren werden die b -glatten z_i zu 1.