# AES etwas genauer betrachtet

Um diesen Abschnitt bearbeiten zu können, solltest du mit den wesentlichen Begriffen der modernen symmetrischen Kryptoverfahren vertraut sein.

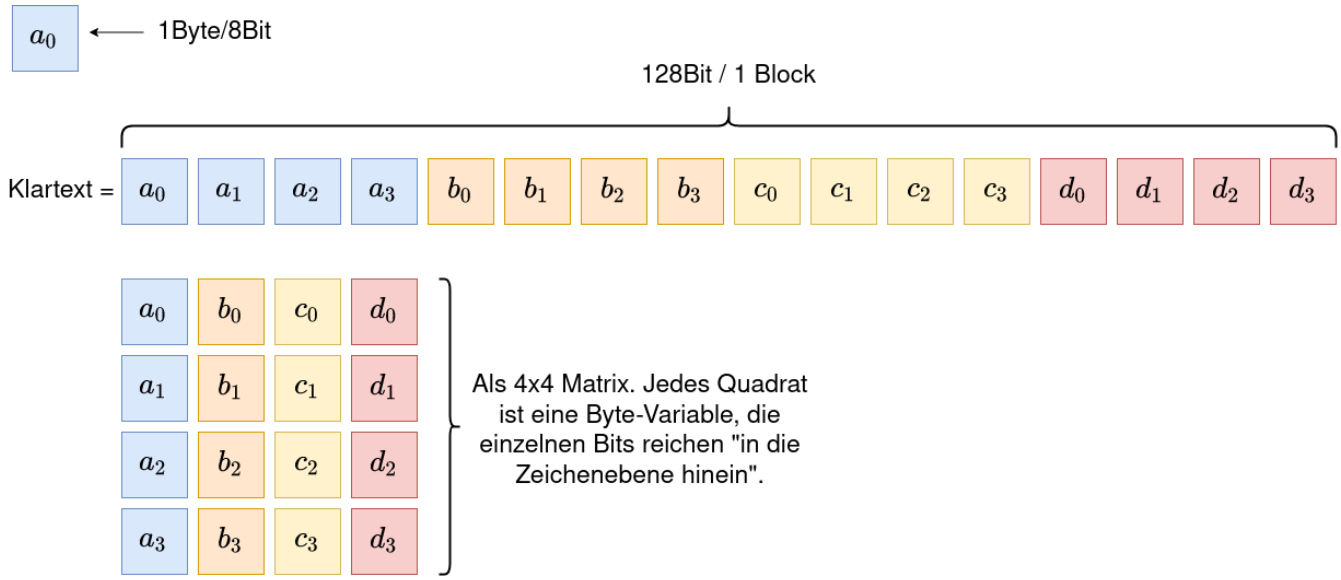
## Schlüssellänge und Rundenzahl

Die **Blocklänge** des AES beträgt **128 Bit**. Die AES-Schlüssellänge kann wahlweise auf 128, 192 oder 256 Bit festgelegt werden, die Rundenzahl hängt von der gewählten Schlüssellänge ab:

| Schlüssellänge | Rundenzahl |
|---|---|
| 128 Bit | 10 |
| 192 Bit | 12 |
| 256 Bit | 14 |

## Klartextblock als Matrix

Alle Operationen werden auf einer 4x4 Byte Matrix ausgeführt, dazu werden die 128Bit des Klartextblocks wie folgt angeordnet:




## Rundenaufbau

Wir betrachten nur den AES mit 128Bit Schlüssellänge und 10 Runden.

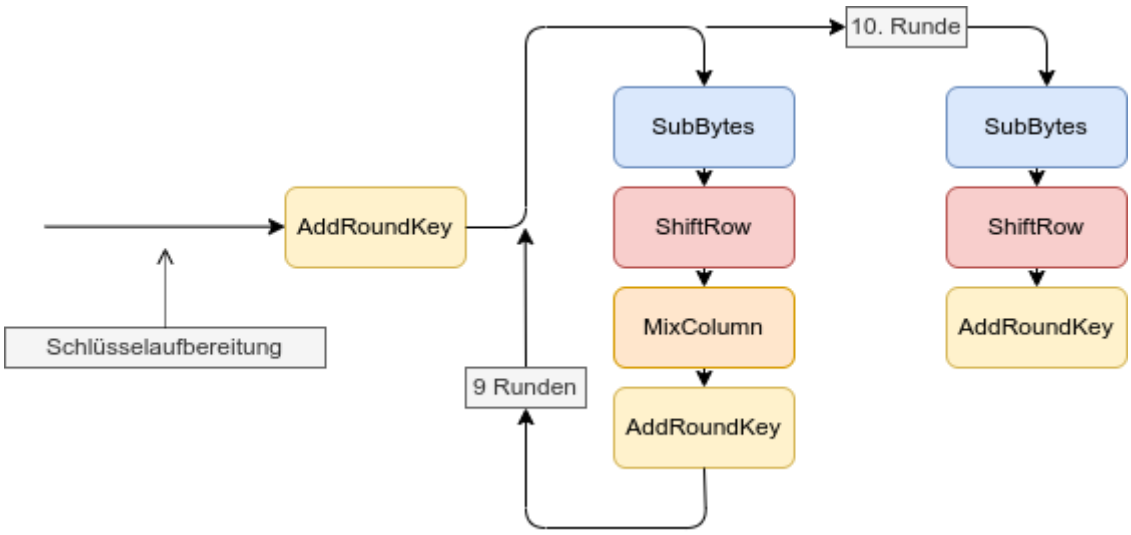
Der AES verfügt über die folgenden Operationen, die im Ablauf der Runden zum Einsatz kommen und auf der 4x4 Byte Matrix ausgeführt werden:

- SubBytes
- ShiftRow

- MixColumn
- AddRoundKey

Die mathematischen Details der Operationen beleuchten wir an dieser Stelle nicht.

Der Ablauf ist wie folgt:



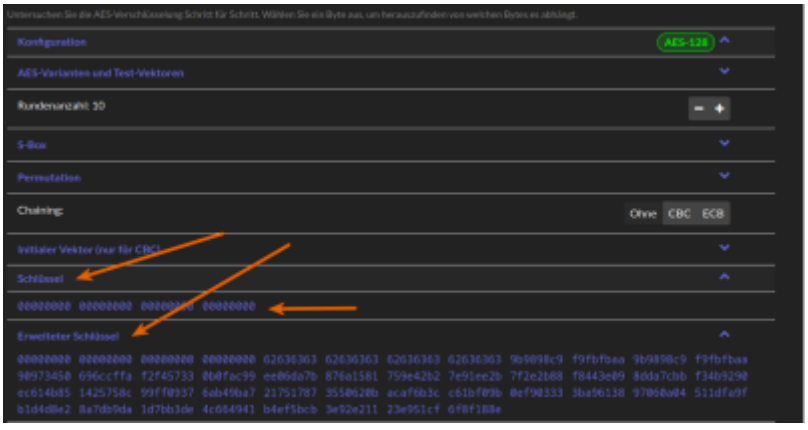

---

**(A1)**

Wieviele Rundenschlüssel sind nötig? Wie viel (Bit/Byte) Schlüsselmaterial muss bei der Schlüsselaufbereitung erzeugt werden? Ein Rundenschlüssel ist 16Byte lang.

Beobachte die Schlüsselaufbereitung im Cryptool. Klappe die Abschnitte `Schlüssel` und `Erweiterter Schlüssel` aus. Ändere anschließend den Wert für den Schlüssel und beobachte, was im Feld erweiterter Schlüssel geschieht.

Überprüfe, ob die Menge des Schlüsselmaterials beim erweiterten Schlüssel mit deinen eigenen Überlegen übereinstimmt.



# Was macht SubBytes?

Die Rundenfunktion "SubBytes" dient zur **kryptographischen Konfusion** und ist mit einer S-Box realisiert. Die AES S-Box ist eine feste Zuordnungstabelle, in der für jeden Byte-Wert von 00 bis FF (0-255) festgelegt ist, durch welchen anderen Byte-Wert ein Eingabebyte ersetzt werden soll.

Bei der Ersetzung wird nun jedes Byte der 4x4 Matrix durch seine entsprechende Ersetzung ersetzt. Im Cryptool kann man die AES S-Box sehen:

S-Box

```
637c777b f26b6fc5 3001672b fed7ab76 ca82c97d fa5947f0 add4a2af 9ca472c0 b7fd9326 363ff7cc 34a5e5f1 71d83115
04c723c3 1896059a 071280e2 eb27b275 09832c1a 1b6e5aa0 523bd6b3 29e32f84 53d100ed 20fcb15b 6acbbe39 4a4c58cf
d0efaafb 434d3385 45f9027f 503c9fa8 51a3408f 929d38f5 bcb6da21 10fff3d2 cd0c13ec 5f974417 c4a77e3d 645d1973
60814fdc 222a9088 46eeb814 de5e0bdb e0323a0a 4906245c c2d3ac62 9195e479 e7c8376d 8dd54ea9 6c56f4ea 657aae08
ba78252e 1ca6b4c6 e8dd741f 4bbd8b8a 703eb566 4803f60e 613557b9 86c11d9e e1f89811 69d98e94 9b1e87e9 ce5528df
8ca1890d bfe64268 41992d0f b054bb16
```

Dabei sind 2 Hexadezimale Stellen jeweils ein Byte und man zählt vom Beginn der S-Box an von 00 bis FF (von 0 bis 255), damit ergeben sich folgende Ersetzungen:

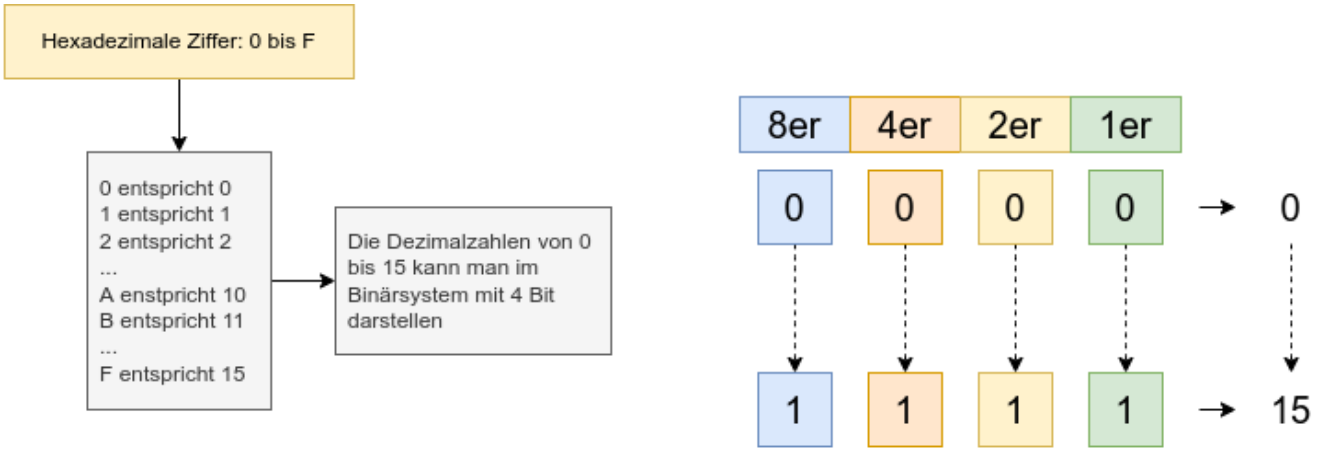
```
00 -> 63
01 -> 7c
02 -> 77
...
fe -> bb
ff -> 16
```

---

**(A2)**

Mache dir zunächst noch einmal klar, dass 2 hexadezimale Ziffern 8 Bit, also ein Byte repräsentieren.

Hilfestellung




Also entspricht **eine** hexadezimale **Ziffer 4 Bit**, **zwei** hexadezimale **Ziffern** also **8 Bit** und damit einem Byte

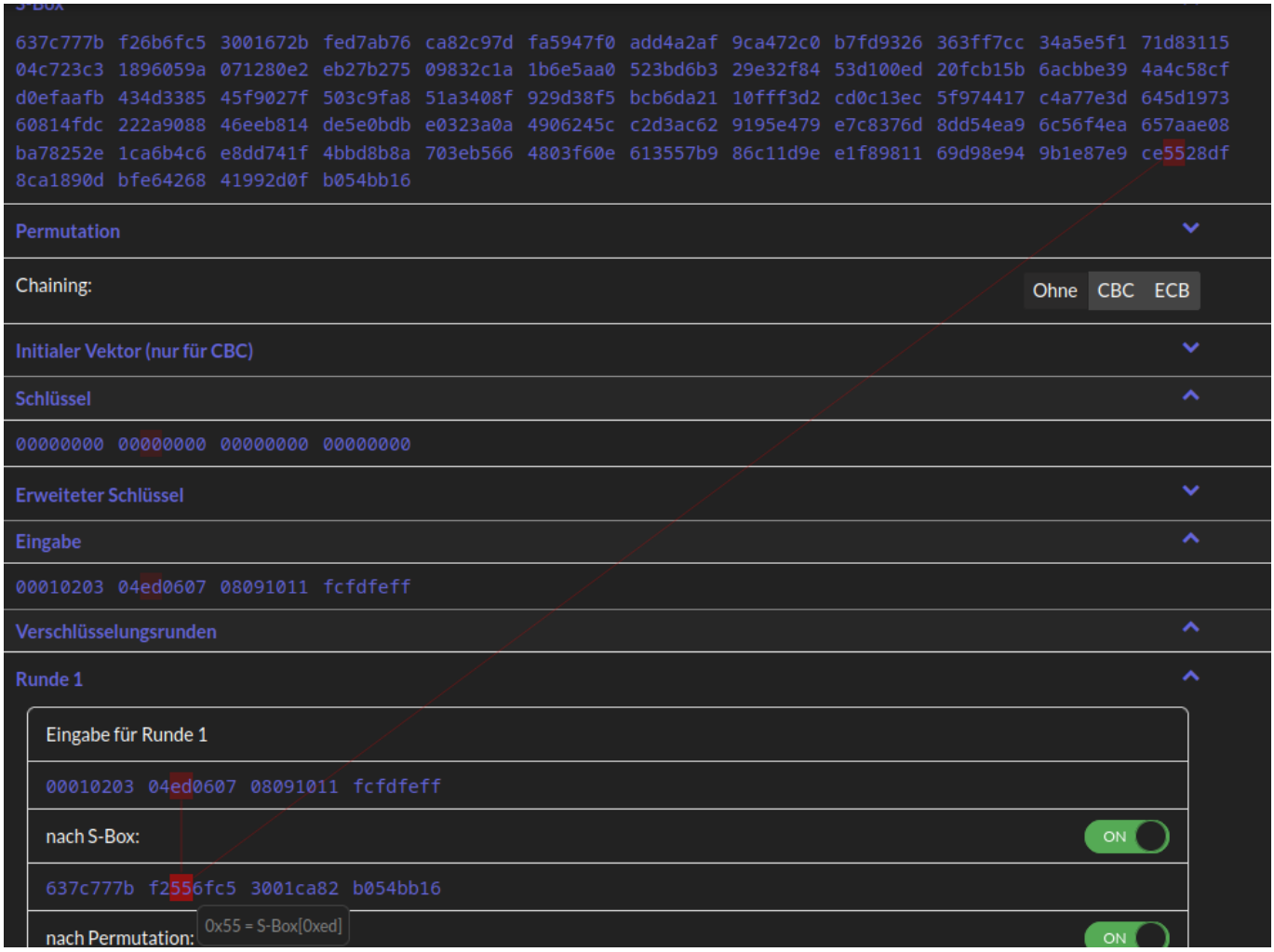
Arbeite im Cryptool zunächst mit dem Schlüssel `00000000 00000000 00000000 00000000` und der Eingabe `00010203 04050607 08091011 fcfdfeff`.

Das hat zur Folge, dass die erste Anwendung von **AddRoundKey** auf den Eingabetext - bevor die Runden beginnen - keine Auswirkung auf die Bitfolge hat, auf die die S-Box angewandt wird.

Mache dir klar, dass die Eingabe von 0 beginnend hoch zählt (12Bytes weit), beziehungsweise von 255 beginnend abwärts zählt (4Bytes weit).

**Tipp:** Wenn du im Cryptool die Bytes der Ergebnisse der Rundenoperationen anklickst, veranschaulicht Cryptool durch dünne Linien, wie der Byte-Wert zustandekommt.

Screenshot



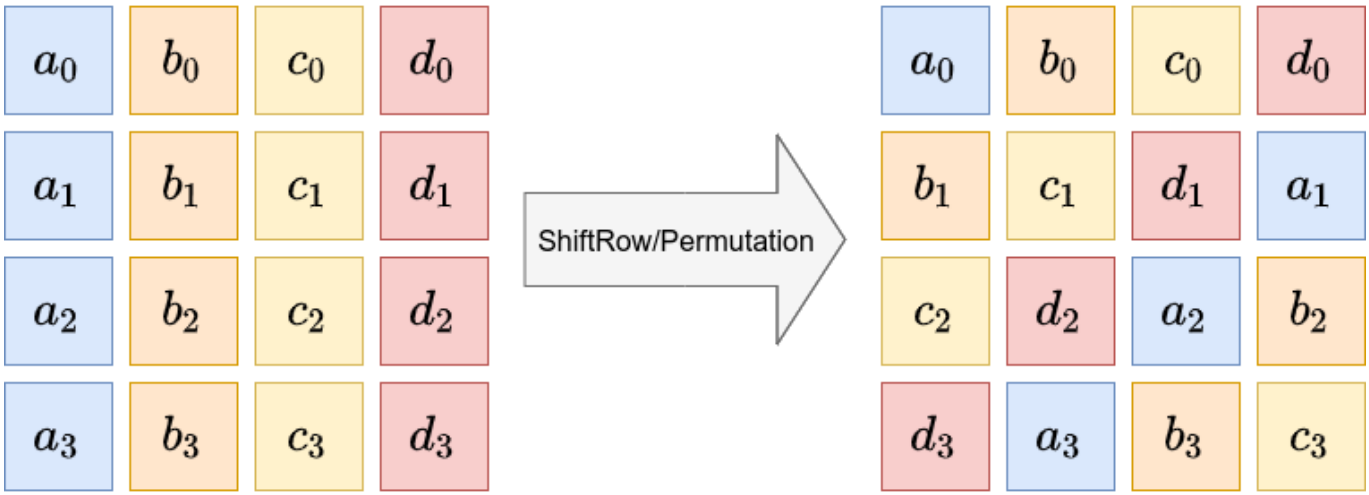

- Vollziehe die Funktionsweise der S-Box an diesem Beispiel nach, indem du die Ersetzungen der ersten 12 sowie der letzten 4 Bytes im Feld `nach S-Box:` des Cryptool überprüfst.
- Ändere den Eingabetext und beobachte die Auswirkungen. Findest du passende Ersetzungen?
- Ändere den Schlüssel und beobachte die Auswirkungen: Warum ändert sich jetzt die Bitfolge für das Feld `Eingabe für Runde 1`?

Zusatzfrage: Welcher Text ist in der folgenden Eingabe codiert? `496e666f 20697374 20746f6c 6c21210a`

# Die Funktionsweise von ShiftRow

**ShiftRow** dient zur **kryptographischen Diffusion**. Im Cryptool wird "ShiftRow" als **Permutation** (Vertauschung) benannt.

Anschaulich rotiert ShiftRow die Bytes in den Zeilen der 4x4 Matrix des Byte-Blocks:




Im Cryptool ist die Permutation durch eine entsprechende Bytefolge im Abschnitt Konfiguration festgelegt. Für den "Standard AES" Algorithmus wird stets getauscht, wie im Bild dargestellt.

---

**(A3)**

Vollziehe im Cryptool nach, dass die Bytes in den Zeilen tatsächlich so vertauscht werden, wie im Bild oben dargestellt.

- Wie gelangt man von der Darstellung im Cryptool (z.B.: `637c777b f2556fc5 3001ca82 b054bb16` zur Matrix wie im Bild dargestellt?
- Notiere die Matrix für ein Beispiel aus Cryptool einmal vor und einmal nach ShiftRow.

# MixColumn

Die Funktion MixColumn trägt wie ShiftRow zur **Diffusion** bei. Im Vergleich zum sehr simplen ShiftRow ist MixColumn komplexer, es wird eine spezielle "Multiplikation" der Bytes in der Matrix verwendet, welche mit "Exklusiv-Oder" Verknüpfungen kombiniert wird. Eine genaue Betrachtung führt an dieser Stelle zu weit.

**Wichtig:** Während ShiftRow für eine Durchmischung der Zeilen sorgt, führt **MixColumn ein spaltenweises Mischen** durch.

---

**(A4)**

Vollziehe im Cryptool nach, dass MixColumns tatsächlich aus allen Bytes einer Spalte ein neues Element der Byte-Matrix erzeugt und damit tatsächlich die Spalten durchmischt.

# AddRoundKey

Die Funktion **AddRoundKey** verknüpft die Eingabe einer Runde exklusiv oder mit dem Rundenschlüssel. Vor der ersten Runde wird **AddRoundKey** mit dem ursprüngliche AES Schlüssel auf diese Weise mit dem Eingabetext verknüpft.

---

**(A5)**

Vollziehe die erste Verknüpfung des AES Schlüssels mit dem Klartext im Cryptool nach.

- Verwende dazu zunächst als Schlüssel `00000000 00000000 00000000 00000000`. Der Eingabetext wird durch das initiale AddRoundKey nicht verändert - warum nicht?
- Ändere nun den Schlüssel an einer Stelle (z.B. ganz am Ende) und beobachte die Änderung des Felds `Eingabe für Runde 1`. Vollziehe diese Veränderung mit der XOR Verknüpfung nach. Dazu kannst du die betroffenen Bytes Bitweise untereinander schreiben.[1)]

# Vollständiger Verschlüsselungsvorgang

Jetzt können wir einen gesamten Verschlüsselungsvorgang nachvollziehen.

---

**(A6)**

Vollziehe eine vollständige Verschlüsselung über alle 10 Runden grob nach:

- Mache dir klar, dass das Ergebnis einer Runde stets als Eingabe der folgenden Runde verwendet wird.
- Beobachte die Verwendung der 11 Subkeys im Verlauf der Verschlüsselung - wird tatsächlich in jeder Runde ein anderen Rundenschlüssel verwendet?
- Untersuche, ob in Runde 10 MixColumn durchgeführt wird oder nicht.
- Mache dir klar, dass durch diesen Ablauf ein Block von 128Bit Daten (Klartext) auf einen Block von 128Bit Daten "abgebildet" werden, die nun als Geheimtext bezeichnet werden können. Das

geschieht in 10 Runden - beim AES handelt es sich also um eine **rundenbasierte Blockchiffre**.

1)

Oder ein Werkzeug wie den XOR Calculator vwerdenden: https://xor.pw/