

# Endliche Körper

**Dozent:** Prof. Dr. Michael Eichberg

**Version:** 2024-02-16

**Basierend auf:** *Cryptography and Network Security - Principles and Practice, 8th Edition, William Stallings*



# Gruppen, Ringe und Körper

(((((

endliche Körper

in Körper)

in Integritätsring)

in kommutative Ringe)

in Ringe)

in Abel'schen Gruppen)

in Gruppen)

**Integritätsring:**  *Integral Domains*

**Körper:**  *Fields*

**neutrales Element:**  
 *Identity element*

Übersetzungen von mathematischen Fachbegriffen in Deutsche: <https://www.henkede.de/woerterbuch.htm>

# Gruppen

Eine Menge von Elementen mit einer binären Operation  $\cdot$ , die jedem geordneten Paar  $(a, b)$  von Elementen in  $G$  ein Element  $(a \cdot b) \in G$  zuordnet, so dass die folgenden Axiome befolgt werden:

**(A1) Abgeschlossenheit:**

Wenn  $a$  und  $b$  zu  $G$  gehören, dann ist  $a \cdot b$  auch in  $G$ .

**(A2) Assoziativität:**

$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$  für alle  $a, b, c \in G$ .

**(A3) Existenz eines neutralen Elements:**

Es gibt ein Element  $e \in G$ , so dass  $a \cdot e = e \cdot a = a$  für alle  $a \in G$

**(A4) Existenz eines inversen Elements:**

Für jedes  $a \in G$  gibt es ein Element  $a'$  in  $G$ , so dass

$$a \cdot a' = a' \cdot a = e$$

# Abel'sche Gruppen

(A1 bis A4) und:

**(A5) Kommutativität:**

$$a \cdot b = b \cdot a \text{ für alle } a, b \in G$$

# Zyklische Gruppen

- Die Potenzierung ist innerhalb einer Gruppe als eine wiederholte Anwendung des Gruppenoperators definiert, so dass  $a^3 = a \cdot a \cdot a$ .
- Wir definieren  $a^0 = e$  als das neutrale Element, und  $a^{-n} = (a')^n$ , wobei  $a'$  das inverse Element von  $a$  innerhalb der Gruppe ist.
- Eine Gruppe  $G$  ist zyklisch, wenn jedes Element von  $G$  eine Potenz  $a^k$  ( $k$  ist eine ganze Zahl) eines festen Elements  $a \in G$  ist.
- Das Element  $a$  erzeugt somit die Gruppe  $G$ .  $a$  ist somit der Generator von  $G$ .
- Eine zyklische Gruppe ist immer abelsch und kann endlich oder unendlich sein.

Eine zyklische Gruppe ist z.B.  $1, 2, 4, 8, 16, \dots$  mit  $a = 2$  und  $e = 1$  ( $k$  muss nicht Teil der zyklischen Gruppe sein.)

# Ringe

- Ein Ring  $R$ , manchmal auch als  $\{R, +, \times\}$  bezeichnet, ist eine Menge von Elementen mit zwei binären Operationen, genannt Addition und Multiplikation, so dass für alle  $a, b, c \in R$  die Axiome (A1-A5) erfüllt sind.
- $R$  ist eine abelsche Gruppe in Bezug auf die Addition; das heißt,  $R$  erfüllt die Axiome A1 bis A5. Für den Fall einer additiven Gruppe bezeichnen wir das neutrale Element als  $0$  und den Kehrwert von  $a$  als  $-a$ .

# Ringe

## **(M1) Abgeschlossenheit der Multiplikation:**

Wenn  $a$  und  $b$  teil von  $R$  sind, dann ist  $ab$  auch in  $R$

## **(M2) Assoziativität der Multiplikation:**

$$a(bc) = (ab)c \text{ für alle } a, b, c \in R$$

## **(M3) Distributivgesetz:**

$$a(b + c) = ab + ac \text{ für alle } a, b, c \in R$$

$$(a + b)c = ac + bc \text{ für alle } a, b, c \in R$$

Im Wesentlichen ist ein Ring eine Menge, in der wir Addition, Subtraktion [ $a - b = a + (-b)$ ] und Multiplikation durchführen können, ohne die Menge zu verlassen.

# Ringe

- Ein Ring wird als kommutativ bezeichnet, wenn er die folgende zusätzliche Bedingung erfüllt:

**(M4) Kommutativität der Multiplikation:**

$$ab = ba \text{ für alle } a, b \in R$$



# Integritätsring

Ein kommutativer Ring, der den folgenden Axiomen gehorcht:

**(M5) Existenz eines neutralen Elements bzgl. der Multiplikation:**

Es gibt ein Element  $1$  in  $R$ , so dass  $a1 = 1a = a$  für alle  $a \in R$

**(M6) Keine Nullteiler:**

Wenn  $a, b \in R$  und  $ab = 0$ , dann ist entweder  $a = 0$  oder  $b = 0$

# Körper

- Ein Feld  $F$ , manchmal auch bezeichnet als  $\{F, +, \times\}$ , ist eine Menge von Elementen mit zwei binären Operationen, genannt Addition und Multiplikation, so dass für alle  $a, b, c \in F$  die Axiome (A1-M6) gelten.
- $F$  ist ein Integritätsbereich, d.h.  $F$  erfüllt die Axiome A1 bis A5 und M1 bis M6

## **(M7) Existenz der multiplikativen Inversen:**

Für jedes  $a$  in  $F$ , außer 0, gibt es ein Element  $a^{-1} \in F$ , so dass

$$aa^{-1} = (a^{-1})a = 1$$

# Körper

- Im Wesentlichen ist ein Körper eine Menge, in der wir Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division durchführen können, ohne die Menge zu verlassen. Die Division ist mit der folgenden Regel definiert:  $a/b = a(b^{-1})$

## Beispiel

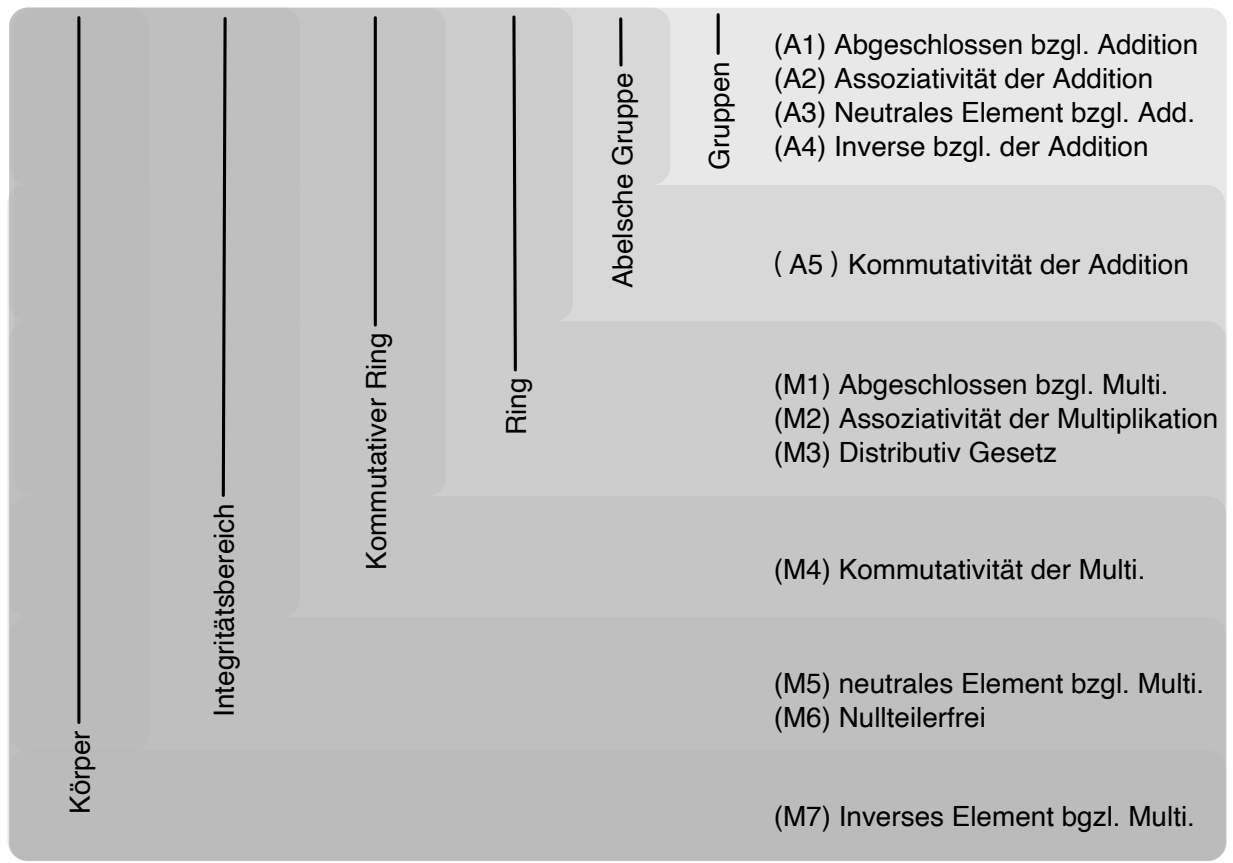
Bekannte Beispiele für Körper sind die rationalen Zahlen, die reellen Zahlen und die komplexen Zahlen.

## Hinweis

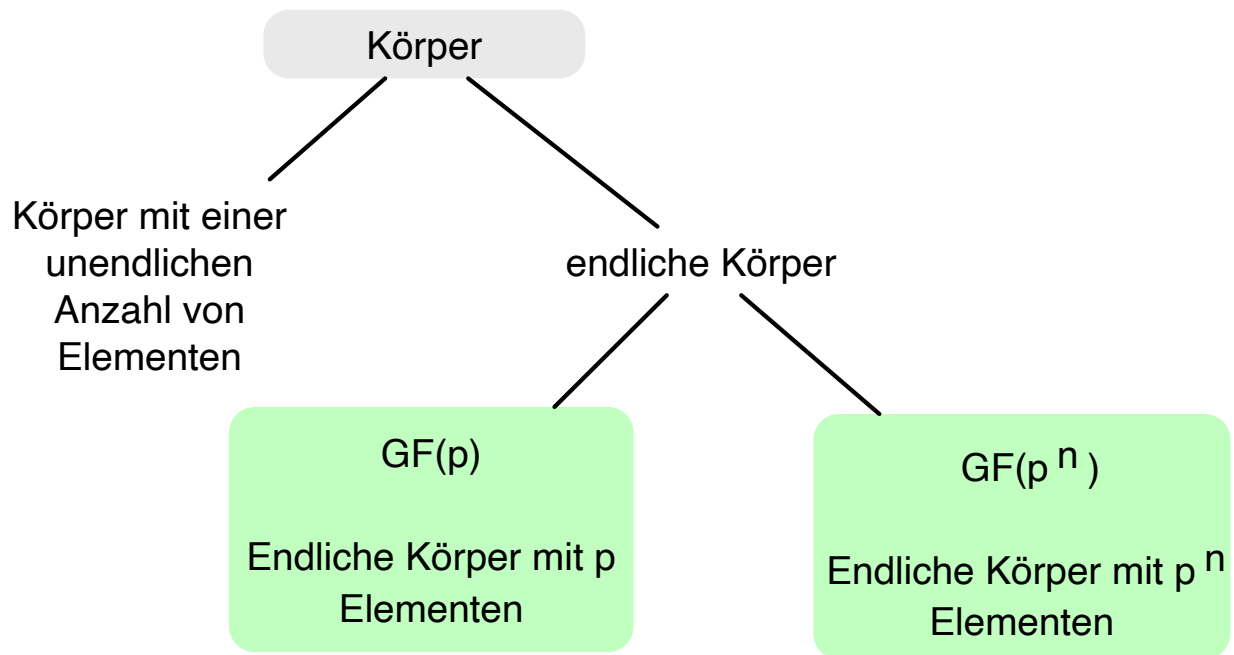
Die Menge aller ganzen Zahlen mit den üblichen Operationen bildet keinen Körper, da nicht jedes Element der Menge ein multiplikatives Inverses hat.

# Eigenschaften von Gruppen, Ringen und Körpern



## Zusammenfassung



# Unterteilung von Körpern



# Endliche Körper der Form $GF(p)$

- Endliche Körper bilden die Grundlage von Fehlererkennungs- / Fehlerkorrekturcodes und insbesondere von bedeutenden kryptografischen Algorithmen.
- Es kann gezeigt werden, dass die Ordnung eines endlichen Körpers eine Potenz einer Primzahl  $p^n$  sein muss, wobei  $n$  eine positive ganze Zahl ist.
- Das endliche Feld der Ordnung  $p^n$  wird allgemein als  $GF(p^n)$  bezeichnet.
- GF steht für  *Galois Field* ( *Galoiskörper*), zu Ehren des Mathematikers, der als erster endliche Körper untersucht hat.

Die Ordnung eines endlichen Feldes ist die Anzahl der Elemente des Feldes.

# Addition Modulo 8

+	0	1	2	3	4	5	6	7
0	<b>0</b>	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	6	7	<b>0</b>
2	2	3	4	5	6	7	<b>0</b>	1
3	3	4	5	6	7	<b>0</b>	1	2
4	4	5	6	7	<b>0</b>	1	2	3
5	5	6	7	<b>0</b>	1	2	3	4
6	6	7	<b>0</b>	1	2	3	4	5
7	7	<b>0</b>	1	2	3	4	5	6

# Multiplikation Modulo 8

$\times$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	<b>1</b>	2	3	4	5	6	7
2	0	2	4	6	0	2	4	6
3	0	3	6	<b>1</b>	4	7	2	5
4	0	4	0	4	0	4	0	4
5	0	5	2	7	4	<b>1</b>	6	3
6	0	6	4	2	0	6	4	2
7	0	7	6	5	4	3	2	<b>1</b>



# Additive and Multiplikative Inverse Modulo 8

$w$	$-w$	$w^{-1}$
0	0	—
1	7	1
2	6	—
3	5	3
4	4	—
5	3	5
6	2	—
7	1	7

# Addition Modulo 7

+	0	1	2	3	4	5	6
0	<b>0</b>	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	<b>0</b>
2	2	3	4	5	6	<b>0</b>	1
3	3	4	5	6	<b>0</b>	1	2
4	4	5	6	<b>0</b>	1	2	3
5	5	6	<b>0</b>	1	2	3	4
6	6	<b>0</b>	1	2	3	4	5

# Multiplikation Modulo 7

$\times$	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	<b>1</b>	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	<b>1</b>	3	5
3	0	3	6	2	5	<b>1</b>	4
4	0	4	<b>1</b>	5	2	6	3
5	0	5	3	<b>1</b>	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	<b>1</b>

# Additive und Multiplikative Inverse Modulo 7

$w$	$-w$	$w^{-1}$
0	0	—
1	6	1
2	5	4
3	4	5
4	3	2
5	2	3
6	1	6

# Der Körper GF(2)

Addition

+	0	1
0	0	1
1	1	0

Multiplikation

$\times$	0	1
0	0	0
1	0	1

Inverse

$w$	$-w$	$w^{-1}$
0	0	0
1	0	1

# Endliche Körper - Konstruktion

In diesem Abschnitt haben wir gezeigt, wie man endliche Körper der Ordnung  $p$  konstruiert, wobei  $p$  prim ist.

$GF(p)$  ist mit den folgenden Eigenschaften definiert:

1.  $GF(p)$  besteht aus  $p$  Elementen.
2. Die binären Operationen  $+$  und  $\times$  sind über der Menge definiert. Die Operationen der Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division können durchgeführt werden, ohne die Menge zu verlassen. Jedes Element der Menge, das nicht 0 ist, hat eine multiplikative Inverse.

## Quintessenz

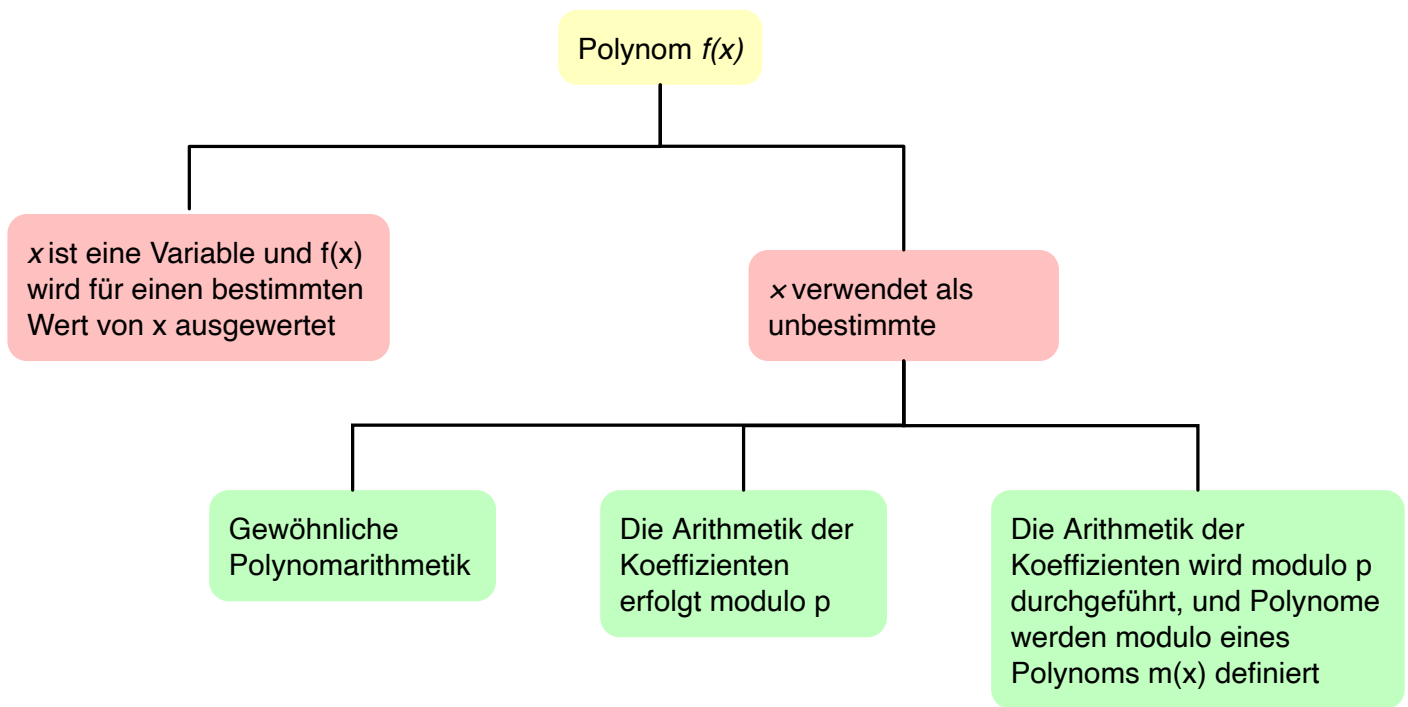
Wir haben gezeigt, dass die Elemente von  $GF(p)$  die ganzen Zahlen  $\{0, 1, \dots, p-1\}$  sind und dass die arithmetischen Operationen Addition und Multiplikation modulo  $p$  sind.

22

## Hinweis

Die modulare Arithmetik Modulo 8 ist *kein* Körper.

# Die Behandlung von Polynomen



(indeterminate  *unbestimmte*)

# Beispiel für gewöhnliche Polynomarithmetik

**Addition:**

$$(x^3 + x^2 + 2) + (x^2 - x + 1) = x^3 + 2x^2 - x + 3$$

**Subtraktion:**

$$(x^3 + x^2 + 2) - (x^2 - x + 1) = x^3 + x + 1$$



# Beispiel für gewöhnliche Polynomarithmetik

**Multiplikation:**

$$(x^3 + x^2 + 2) \times (x^2 - x + 1) =$$

$$\begin{array}{rcccccccc} & & & & x^3 & + & x^2 & & + & 2 \\ & & - & x^4 & - & x^3 & & - & 2x & \\ x^5 & + & x^4 & & & + & 2x^2 & & & = \\ x^5 & & & + & 3x^2 & - & 2x & & + & 2 \end{array}$$

**Division:**

$$(x^3 + x^2 + 2) : (x^2 - x + 1) = x + 2 + \left( \frac{x}{x^2 - x + 1} \right)$$

# Polynomarithmetik mit Koeffizienten in $\mathbb{Z}_p$

- Wenn jedes eindeutige Polynom als Element der Menge betrachtet wird, dann ist diese Menge ein Ring.
- Wenn die Polynomarithmetik auf Polynomen über einem Körper durchgeführt wird, dann ist die Division möglich.
- Wenn wir versuchen, eine Polynomdivision über eine Koeffizientenmenge durchzuführen, die kein Körper ist, dann ist die Division nicht immer definiert.

Das bedeutet nicht, dass eine exakte Teilung möglich ist.
- Auch wenn die Koeffizientenmenge ein Körper ist, ist die Polynomdivision nicht unbedingt exakt.
- Unter der Voraussetzung, dass Reste erlaubt sind, dann ist die Polynomdivision möglich wenn die Koeffizientenmenge ein Körper bildet.

# Polynomiale Division

- Wir können jedes Polynom in der Form schreiben:  $f(x) = q(x)g(x) + r(x)$ 
  - $r(x)$  kann als Rest interpretiert werden
  - Es gilt  $r(x) = f(x) \bmod g(x)$
- Wenn es keinen Rest gibt, dann teilt  $g(x)$  das Polynom  $f(x)$ 
  - Notation:  $g(x) | f(x)$
  - Wir können sagen, dass  $g(x)$  ein Faktor von  $f(x)$  ist
  - Oder  $g(x)$  ist ein Teiler von  $f(x)$
- Ein Polynom  $f(x)$  über einem Körper  $F$  ist irreduzibel, genau dann wenn  $f(x)$  nicht als Produkt zweier Polynome ausgedrückt werden kann, die beide Element von  $F$  sind und beide einen niedrigeren Grad als  $f(x)$  haben.
  - Ein irreduzibles Polynom wird auch als Primpolynom bezeichnet.
- Die Polynomdivision kann über die Multiplikation definiert werden. Sei  $a, b \in F$  dann ist  $a/b = a \times b^{-1}$ , wobei  $b^{-1}$  das einzige Element des Körpers ist, für das  $bb^{-1} = 1$  gilt.

# Beispiel für Polynomarithmetik über GF(2)

## Erinnerung

$$\begin{array}{rcl} 1 + 1 & = & 1 - 1 = 0 \\ 1 + 0 & = & 1 - 0 = 1 \\ 0 + 1 & = & 0 - 1 = 1 \end{array}$$

## Addition

$$(x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1) + (x^3 + x + 1) = x^7 + x^5 + x^4$$

1

## Subtraktion

$$(x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1) - (x^3 + x + 1) = x^7 + x^5 + x^4$$

2

# Bestimmung des GGTs zweier Polynome

- Das Polynom  $c(x)$  ist der größte gemeinsame Teiler von  $a(x)$  und  $b(x)$ , wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:
  - $c(x)$  teilt sowohl  $a(x)$  als auch  $b(x)$
  - Jeder Teiler von  $a(x)$  und  $b(x)$  ist auch ein Teiler von  $c(x)$
- Eine äquivalente Definition ist:

$\text{ggT}[a(x), b(x)]$  ist das *Polynom maximalen Grades*, das sowohl  $a(x)$  als auch  $b(x)$  teilt.
- Der euklidische Algorithmus kann erweitert werden, um den größten gemeinsamen Teiler von zwei Polynomen zu finden, deren Koeffizienten Elemente eines Körpers sind.

# Arithmetik in $GF(2^3)$ : Addition

		000	001	010	011	100	101	110	111
	+	0	1	2	3	4	5	6	7
000	0	<b>0</b>	1	2	3	4	5	6	7
001	1	1	<b>0</b>	3	2	5	4	7	6
010	2	2	3	<b>0</b>	1	6	7	4	5
011	3	3	2	1	<b>0</b>	7	6	5	4
100	4	4	5	6	7	<b>0</b>	1	2	3
101	5	5	4	7	6	1	<b>0</b>	3	2
110	6	6	7	4	5	2	3	<b>0</b>	1
111	7	7	6	5	4	3	2	1	<b>0</b>

(Die Definition der Addition des endlichen Körpers  $GF(2^3)$  wird in Kürze behandelt.)

## Wiederholung

Die Subtraktion zweier Element des Körpers kann über die Addition definiert werden. Seien  $a, b \in F$  dann ist  $a - b = a + (-b)$ , wobei  $-b$  das einzige Element in  $F$  ist, für das  $b + (-b) = 0$  gilt ( $-b$  wird als das Negativ von  $b$  bezeichnet).

# Arithmetik in $GF(2^3)$ : Multiplikation

		000	001	010	011	100	101	110	111
	×	0	1	2	3	4	5	6	7
000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
001	1	0	<b>1</b>	2	3	4	5	6	7
010	2	0	2	4	6	3	<b>1</b>	7	5
011	3	0	3	6	5	7	4	<b>1</b>	2
100	4	0	4	3	7	6	2	5	<b>1</b>
101	5	0	5	<b>1</b>	4	2	7	3	6
110	6	0	6	7	<b>1</b>	5	3	2	4
111	7	0	7	5	2	<b>1</b>	6	4	3

(Die Definition der Addition des endlichen Körpers  $GF(2^3)$  wird in Kürze behandelt.)

Die Anzahl der Vorkommen der ganzen Zahlen ungleich Null ist bei der Multiplikation einheitlich (Vor allem im Vergleich zu  $\mathbb{Z}_8$ ); dies ist für kryptographische Zwecke förderlich.

# Arithmetik in $GF(2^3)$

## Additive ( $-w$ ) and Multiplicative Inverses ( $w^{-1}$ )

$w$	$-w$	$w^{-1}$
0	0	—
1	1	1
2	2	5
3	3	6
4	4	7
5	5	2
6	6	3
7	7	4

(Die Werte wurden aus den vorherigen Tabellen abgelesen.)



# Polynomarithmetik über $GF(2^3)$

Um den endlichen Körper  $GF(2^3)$  zu konstruieren, müssen wir ein irreduzibles Polynom vom Grad 3 wählen, d.h. entweder  $(x^3 + x^2 + 1)$  oder  $(x^3 + x + 1)$ .

Mit Multiplikationen modulo  $x^3 + x + 1$  haben wir nur die folgenden acht Polynome in der Menge der Polynome über  $GF(2)$ :

$$0, 1, x, x^2, x + 1, x^2 + 1, x^2 + x, x^2 + x + 1$$

Der Verschlüsselungsalgorithmus **AES** führt die Arithmetik im endlichen Körper  $GF(2^8)$  mit dem folgenden irreduziblen Polynom aus:

$$m(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$$

Die 8 Polynome sind die möglichen "Reste" bei der Division von Polynomen über  $GF(2^3)$  mit  $x^3 + x + 1$ .

# Polynomial Arithmetic in $GF(2^3)$ Modulo $(x^3 + x + 1)$

## Addition

		<i>000</i>	<i>001</i>	<i>010</i>	<i>011</i>	<i>100</i>	<i>101</i>	<i>110</i>	<i>111</i>
	+	0	1	$x$	$x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$
<i>000</i>	0	<b>0</b>	1	$x$	$x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$
<i>001</i>	1	1	<b>0</b>	$x + 1$	$x$	$x^2 + 1$	$x^2$	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x$
<i>010</i>	$x$	$x$	$x + 1$	<b>0</b>	1	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$
<i>011</i>	$x + 1$	$x + 1$	$x$	1	<b>0</b>	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + 1$	$x^2$
<i>100</i>	$x^2$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$	<b>0</b>	1	$x$	$x + 1$
<i>101</i>	$x^2 + 1$	$x^2 + 1$	$x^2$	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x$	1	<b>0</b>	$x + 1$	$x$
<i>110</i>	$x^2 + x$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x$	$x + 1$	<b>0</b>	1
<i>111</i>	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + 1$	$x^2$	$x + 1$	$x$	1	<b>0</b>

# Polynomarithmetik im $GF(2^3)$ Modulo $(x^3 + x + 1)$

## Multiplikation

		<i>000</i>	<i>001</i>	<i>010</i>	<i>011</i>	<i>100</i>	<i>101</i>	<i>110</i>	<i>111</i>
	$\times$	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>x</i>	$x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$
<i>000</i>	<i>0</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>001</i>	<i>1</i>	0	<b>1</b>	<i>x</i>	$x + 1$	$x^2$	$x^2 + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$
<i>010</i>	<i>x</i>	0	<i>x</i>	$x^2$	$x^2 + x$	$x + 1$	<b>1</b>	$x^2 + x + 1$	$x^2 + 1$
<i>011</i>	$x + 1$	0	$x + 1$	$x^2 + x$	$x^2 + 1$	$x^2 + x + 1$	$x^2$	<b>1</b>	<i>x</i>
<i>100</i>	$x^2$	0	$x^2$	$x + 1$	$x^2 + x + 1$	$x^2 + x$	<i>x</i>	$x^2 + 1$	<b>1</b>
<i>101</i>	$x^2 + 1$	0	$x^2 + 1$	<b>1</b>	$x^2$	<i>x</i>	$x^2 + x + 1$	$x + 1$	$x^2 + x$
<i>110</i>	$x^2 + x$	0	$x^2 + x$	$x^2 + x + 1$	<b>1</b>	$x^2 + 1$	$x + 1$	<i>x</i>	$x^2$
<i>111</i>	$x^2 + x + 1$	0	$x^2 + x + 1$	$x^2 + 1$	<i>x</i>	<b>1</b>	$x^2 + x$	$x^2$	$x + 1$

## Beispiel

$$((x^2) \times (x^2 + 1) = x^4 + x^2) \bmod (x^3 + x + 1) = x$$

# Multiplikation in $GF(2^n)$

- Mit keiner einfachen Operation lässt sich die Multiplikation in  $GF(2^n)$  erreichen.
- Es gibt jedoch eine vernünftige, unkomplizierte Technik.

## "Beispiel: Multiplikation in $GF(2^8)$ wie von AES verwendet"

Beobachtung:  $x^8 \bmod m(x) = [m(x) - x^8] = x^4 + x^3 + x + 1$

Es folgt, dass die Multiplikation mit  $x$  (d.h., 0000 0010) als 1-Bit-Linksverschiebung gefolgt von einer bedingten bitweisen XOR-Operation mit 0001 1011 implementiert werden kann:

$$x \times f(x) = \begin{cases} (b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0) & \text{wenn } b_7 = 0 \\ (b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0) \oplus 00011011 & \text{wenn } b_7 = 1 \end{cases}$$

Multiplikation mit einer höheren Potenz von  $x$  kann durch wiederholte Anwendung der vorherigen Gleichung erreicht werden. Durch Hinzufügen von Zwischenergebnissen kann die Multiplikation mit einer beliebigen Konstanten in  $GF(2^n)$  erreicht werden.

Das von **AES** verwendete Polynomial ist:

$$m(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$$

# Überlegungen zur Berechnung

- Da die Koeffizienten 0 oder 1 sind, kann ein solches Polynom als Bitfolge dargestellt werden
  - Addition ist ein XOR dieser Bitstrings
  - Multiplikation ist eine Linksverschiebung gefolgt von einem XOR  
(vgl klassische Multiplikation per Hand.)
- Die Modulo-Reduktion erfolgt durch wiederholtes Ersetzen der höchsten Potenz durch den Rest des irreduziblen Polynoms (auch Shift und XOR)

Füllen Sie die fehlenden Werte aus ( $GF(2^m)$ )

Polynomial	Binary	Decimal
$x^7 + x^6 + x^4 + x + 1$		
	11001001	
		133
$x^4 + x^2 + x$		
	00011001	
		10

Gegeben sei  $GF(2^5)$  mit dem irreduziblen Polynom  $p(x) = x^5 + x^2 + 1$

- Berechne:  $(x^3 + x^2 + x + 1) - (x + 1)$
- Berechne:  $(x^4 + x) \times (x^3 + x^2)$
- Berechne:  $(x^3) \times (x^2 + x^1 + 1)$
- Berechne:  $(x^4 + x)/(x^3 + x^2)$  geben  $(x^3 + x^2)^{-1} = (x^2 + x + 1)$

Zur Erinnerung: Division kann als Multiplikation definiert werden. Seien  $a, b \in F$ , dann ist  $a/b = a \times (b^{-1})$ , wobei  $b^{-1}$  die Umkehrung von  $b$  ist.

- Verifiziere:  $(x^3 + x^2)^{-1} = (x^2 + x + 1)$

- Nehmen wir an, dass 7 und 3 stellvertretend für die Bitmuster der Koeffizienten des Polynoms stehen.
  - Berechne:  $7d - 3d$
  - Berechne:  $7d + 3d$
- Berechne:  $(0x03 \times 0x46)$