System Software for Energy-efficient Computing

Hands-On: Energy-efficient Sorting with QuickSort

Timo Hönig
Operating Systems and System Software

Ruhr-Universität Bochum (RUB)
2. October 2025

Agenda

1. Motivation
2. Funktionsprinzip und Implementierung
3. Nicht-funktionale Eigenschaften
4. Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Motivation

Warum ist Sortierung wichtig?

- Beschleunigung von Datenzugriffen
  ↪ z.B. Latenzreduktion
- Verwaltung großer Datenmengen
  ↪ z.B. Datenspeicherpartitionierung

Welche Art von Sortierung?

Motivation

Warum ist Sortierung wichtig?

- Beschleunigung von Datenzugriffen
  ↪ z.B. Latenzreduktion
- Verwaltung großer Datenmengen
  ↪ z.B. Datenspeicherpartitionierung

Welche Art von Sortierung?

- Sortierung *nach* Typ
  ↪ z.B. heterogene Daten
- Sortierung *innerhalb eines* Typs
  ↪ z.B. Rangordnung und Hierarchie

Motivation

Relevanz in der Praxis

- Sortierung von Schlüsselwertspeicher (engl. key-valye store) → DynamoDB
- Teile-und-Herrsche-Algorithmen (eng. divide and conquer) → Hadoop

amazon DynamoDB

Sortieren mit Quicksort

APACHE hadoop

Motivation

Relevanz in der Praxis

- Sortierung von Schlüsselwertspeicher (engl. key-valye store) → DynamoDB
- Teile-und-Herrsche-Algorithmen (eng. divide and conquer) → Hadoop

Sortieren mit Quicksort

- Sortieralgorithmus, dessen Funktionsprinzip auf Teile und Herrsche beruht
- Entwurf: Charles Antony Richard Hoare

CAR Hoare: Quicksort.
The Computer Journal, 5(1), 1962, pp. 10-16.

Agenda

1. Motivation ✓
2. Funktionsprinzip und Implementierung
3. Nicht-funktionale Eigenschaften
4. Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

- Funktionsprinzip und Pseudocode-Implementierung
- rekursive ex-situ Variante

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

- Abbruchbedingung der Rekursion
- Arrays der Länge ≤ 1 gelten als sortiert

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

- Bestimme Piovtelement für Arrays der Länge > 1: bound
- Neue Listen für kleinere und größere Elemente: a_{less,greater}

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

- Iteriere: Speichere Elemente mit Wert ≤ bound in a_less
- Speichere Elemente mit Wert > bound in a_greater

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

- Rekursiv: Sortiere analog die Listen a_less und a_greater
- Abbau der Rekursion liefert gesamtsortiertes Array

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

Probleme und Verbesserungsmöglichkeit

1. Pivotisierung
   → Dreh- und Angelpunkt
2. dynamische Speicheroperationen
3. entbehrliche Operationen

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

Probleme und Verbesserungsmöglichkeit

1. Pivotisierung
   → Dreh- und Angelpunkt
2. dynamische Speicheroperationen
3. entbehrliche Operationen

- Wahl des Pivotelements (Pivotisierung)
- Verbesserung: Verwenden des arithmetischen Mittels...
  - ... aller Arraywerte
  - ... der Arraywerte an der ersten, mittleren und letzten Position

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

Probleme und Verbesserungsmöglichkeit

1. Pivotisierung
   → Dreh- und Angelpunkt
2. dynamische Speicheroperationen
3. entbehrliche Operationen

- nicht-deterministisches Zeitverhalten
- Verbesserung:
  - Analyse der Eingabedaten → statische Speicherallokation
  - Operationen auf Datenstrukturen der Eingabedaten

Quicksort: Funktionsprinzip und Implementierung

```
1  def function quicksort(array a):
2    if (length(a)) <= 1
3      return a
4
5    int bound = a[length(a)-1]
6    array a_less, a_greater = []
7
8    for each x in a:
9      if x <= bound then
10       append x to a_less
11     else
12       append x to a_greater
13
14   return concatenate (quicksort(a_less), array(bound), quicksort(a_greater))
```

Probleme und Verbesserungsmöglichkeit

1. Pivotisierung
   → Dreh- und Angelpunkt
2. dynamische Speicheroperationen
3. entbehrliche Operationen

- Speicherdruck wegen vieler Funktionsaufrufe der Rekursion
- Verbesserung:
  - alternative Algorithmen (z.B. Insertionsort) für kleine Arrays
  - iterative Implementierung → Vermeidung von Stapelüberläufen

Quicksort: Programmkode, verbesserte Variante

```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4
5    bound = arr[high] # Pivotisierung
6    idx_l = low, idx_r = high - 1
7
8    while idx_l <= idx_r
9      # Überspringe Elemente im Array < Pivotelement
10     while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
11         idx_l += 1
12     # Überspringe Elemente im Array >= Pivotelement
13     while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
14         idx_r -= 1
15     # Tausche Elemente im Array
16     if idx_l < idx_r
17         swap(a, idx_l, idx_r)
18
19   # Platziere Pivotelement
20   swap(a, idx_l, high)
21
22   quicksort(a, low, idx_l - 1)  # Rekursion: linker Teilbereich
23   quicksort(a, idx_l + 1, high) # Rekursion: rechter Teilbereich
```

Funktionsweise und Verbesserungen

- Laufindex idx_l: →
- Laufindex idx_r: ←
- Tausche falls Element a[idx_l] ≥ Pivot und a[idx_r] < Pivot

Quicksort: Programmkode, verbesserte Variante

```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4
5    bound = arr[high] # Pivotisierung
6    idx_l = low, idx_r = high - 1
7
8    while idx_l <= idx_r
9      # Überspringe Elemente im Array < Pivotelement
10     while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
11         idx_l += 1
12     # Überspringe Elemente im Array >= Pivotelement
13     while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
14         idx_r -= 1
15     # Tausche Elemente im Array
16     if idx_l < idx_r
17         swap(a, idx_l, idx_r)
18
19   # Platziere Pivotelement
20   swap(a, idx_l, high)
21
22   quicksort(a, low, idx_l - 1)  # Rekursion: linker Teilbereich
23   quicksort(a, idx_l + 1, high) # Rekursion: rechter Teilbereich
```

Funktionsweise und Verbesserungen

- Speicheroperationen auf Eingabedaten
- Vermeidung dynamischer Speicherallokation

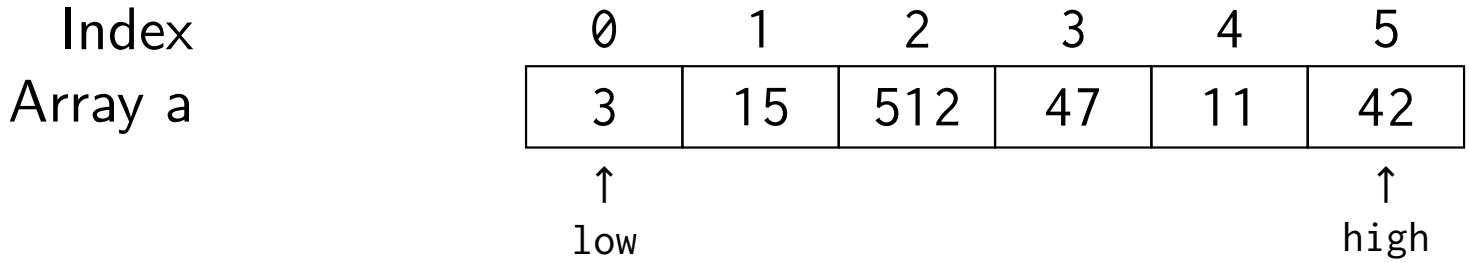
Quicksort: Programmkode, verbesserte Variante

```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4
5    bound = arr[high] # Pivotisierung
6    idx_l = low, idx_r = high - 1
7
8    while idx_l <= idx_r
9      # Überspringe Elemente im Array < Pivotelement
10     while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
11         idx_l += 1
12     # Überspringe Elemente im Array >= Pivotelement
13     while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
14         idx_r -= 1
15     # Tausche Elemente im Array
16     if idx_l < idx_r
17         swap(a, idx_l, idx_r)
18
19   # Platziere Pivotelement
20   swap(a, idx_l, high)
21
22   quicksort(a, low, idx_l - 1)  # Rekursion: linker Teilbereich
23   quicksort(a, idx_l + 1, high) # Rekursion: rechter Teilbereich
```

Funktionsweise und Verbesserungen

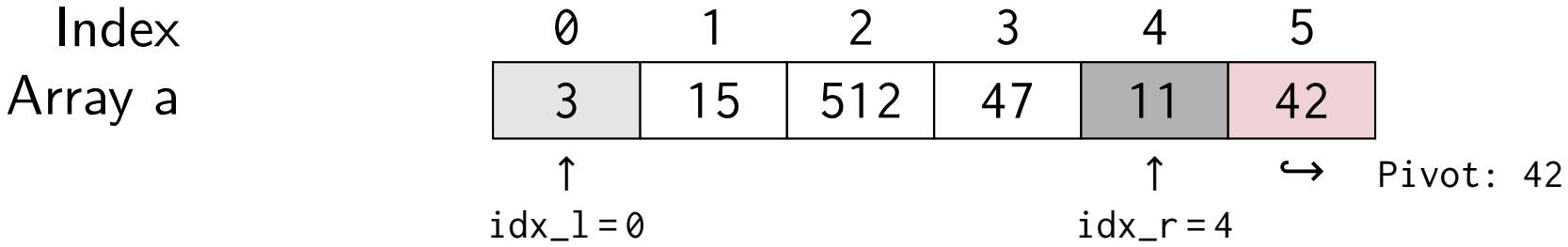
- Speicheroperationen auf Eingabedaten
- Rekursion arbeitet ebenfalls auf Array der Eingabedaten

Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

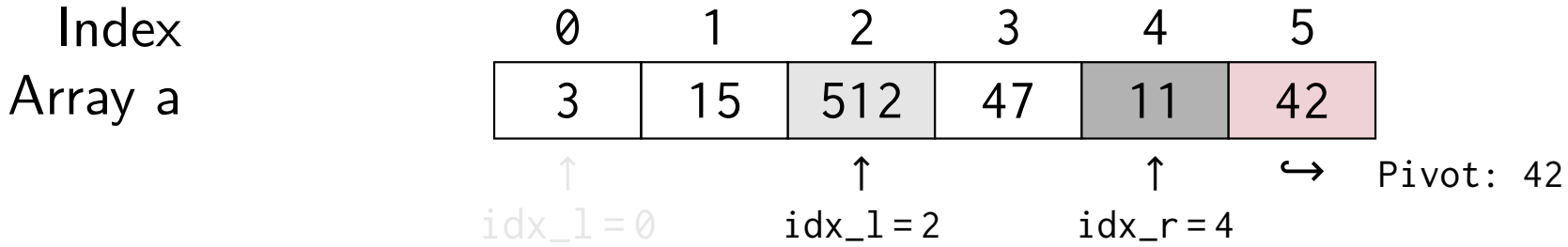
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung

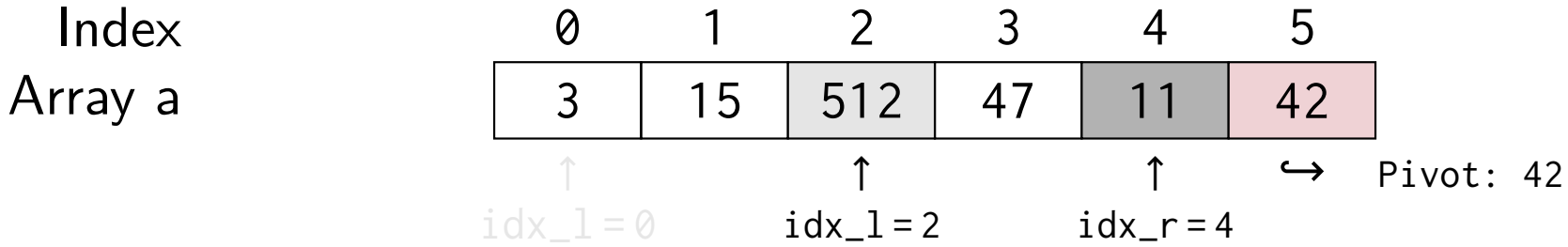
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

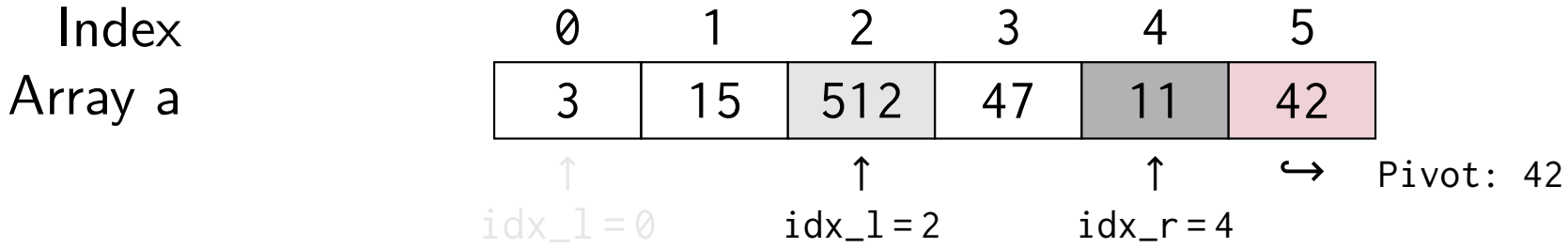
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

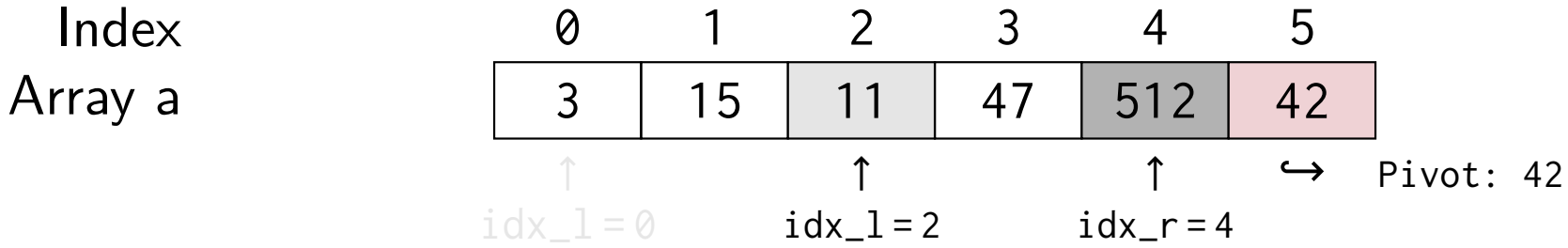
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

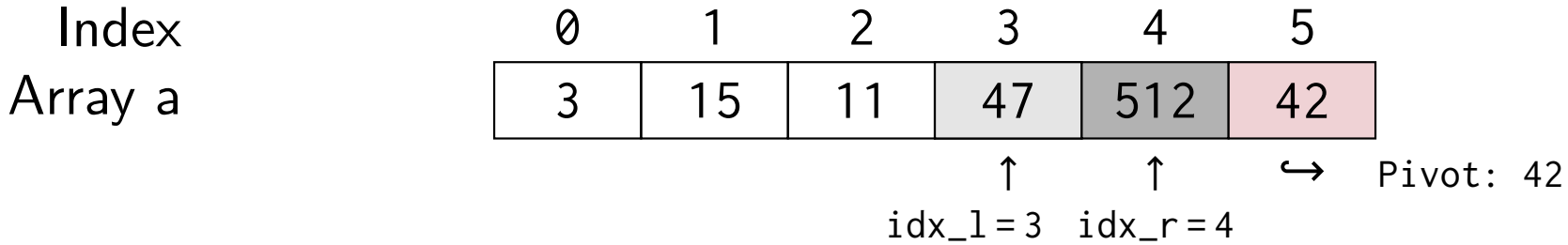
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

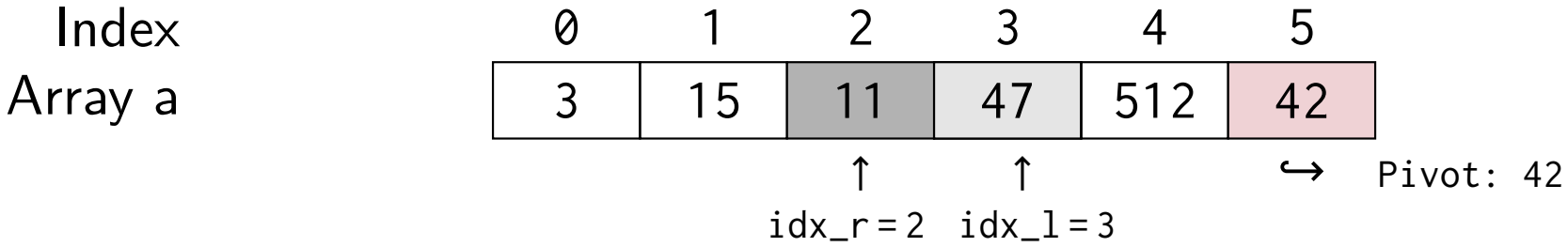
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

Quicksort: Exemplarisches Beispiel

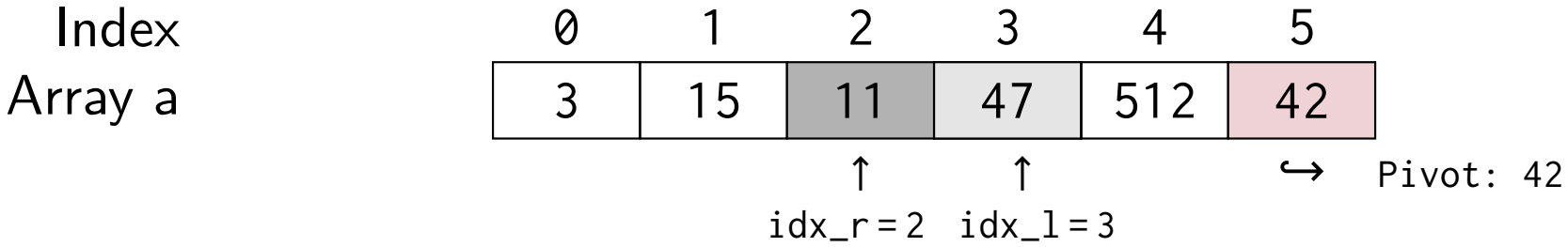



```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung

3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

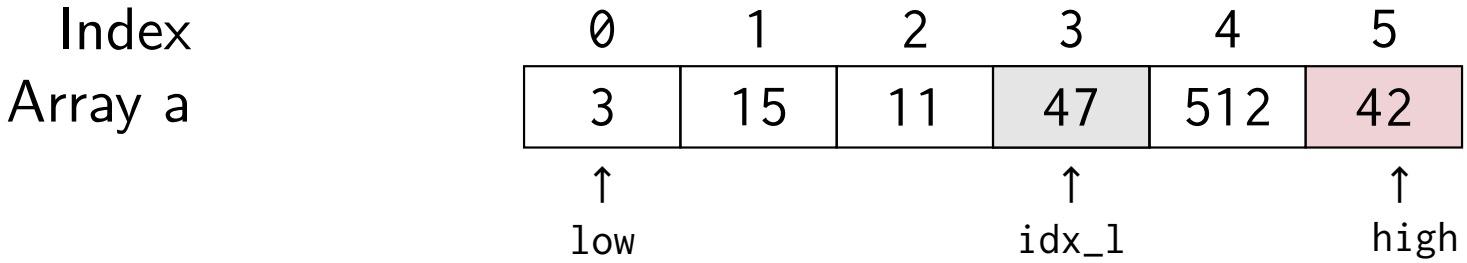
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente

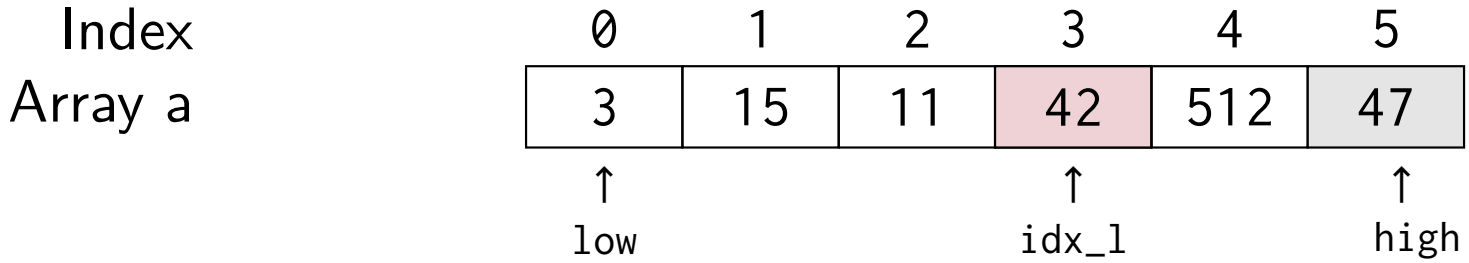
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente
4. Positioniere Pivot

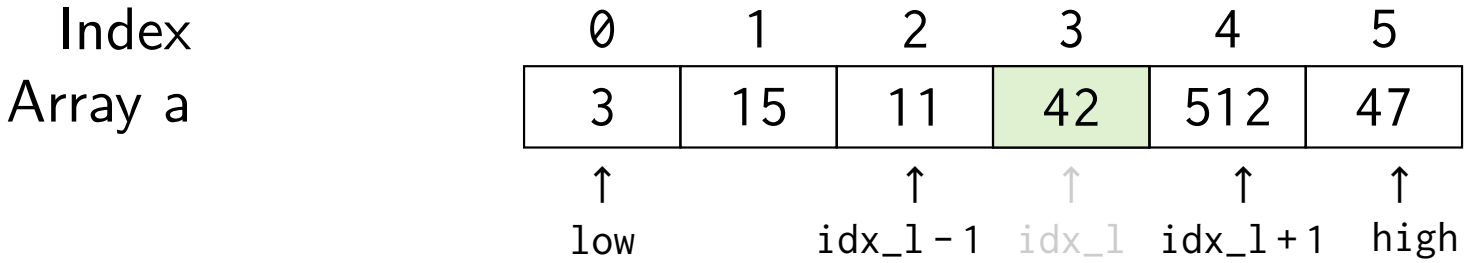
Quicksort: Exemplarisches Beispiel




```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente
4. Positioniere Pivot

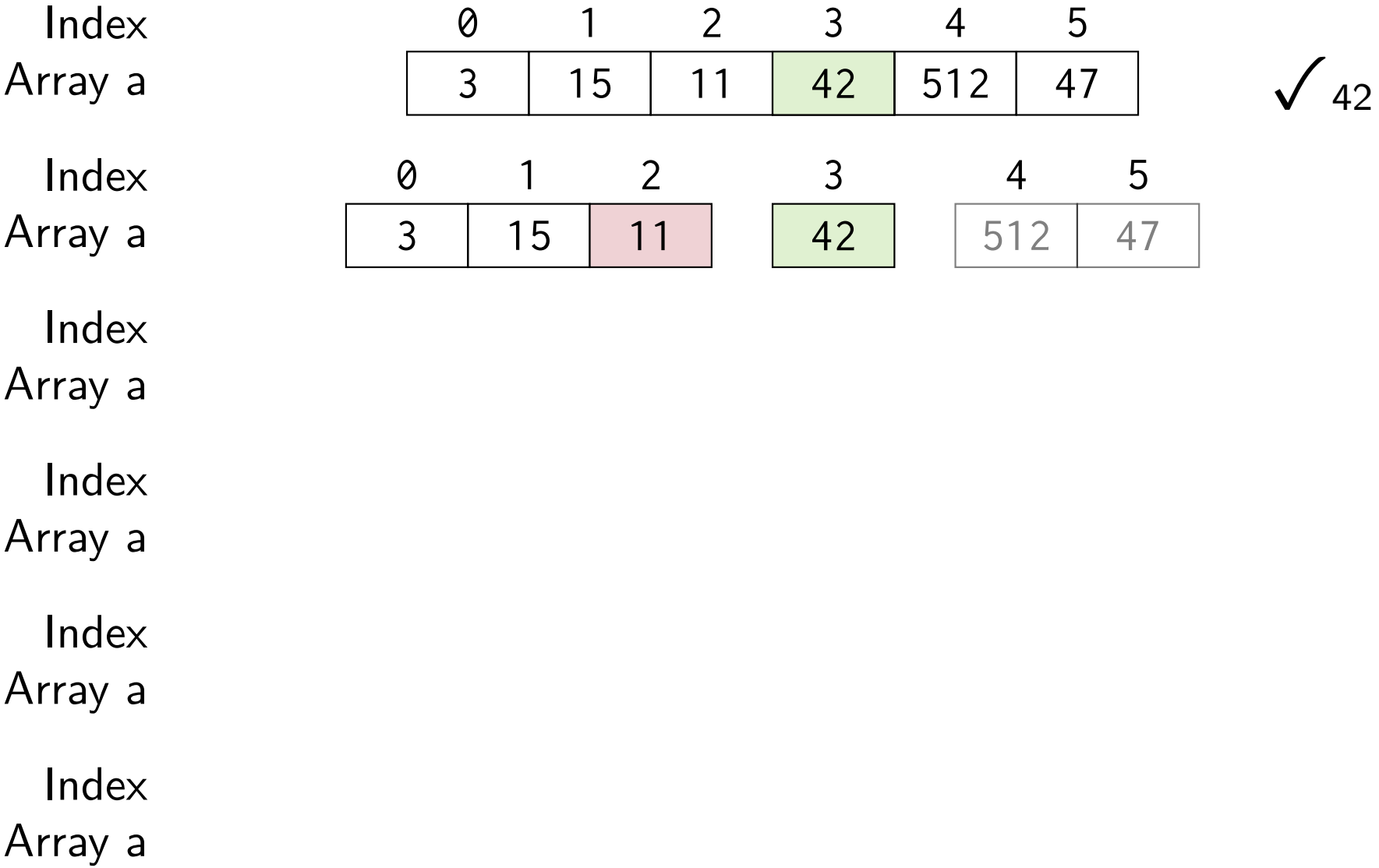
Quicksort: Exemplarisches Beispiel



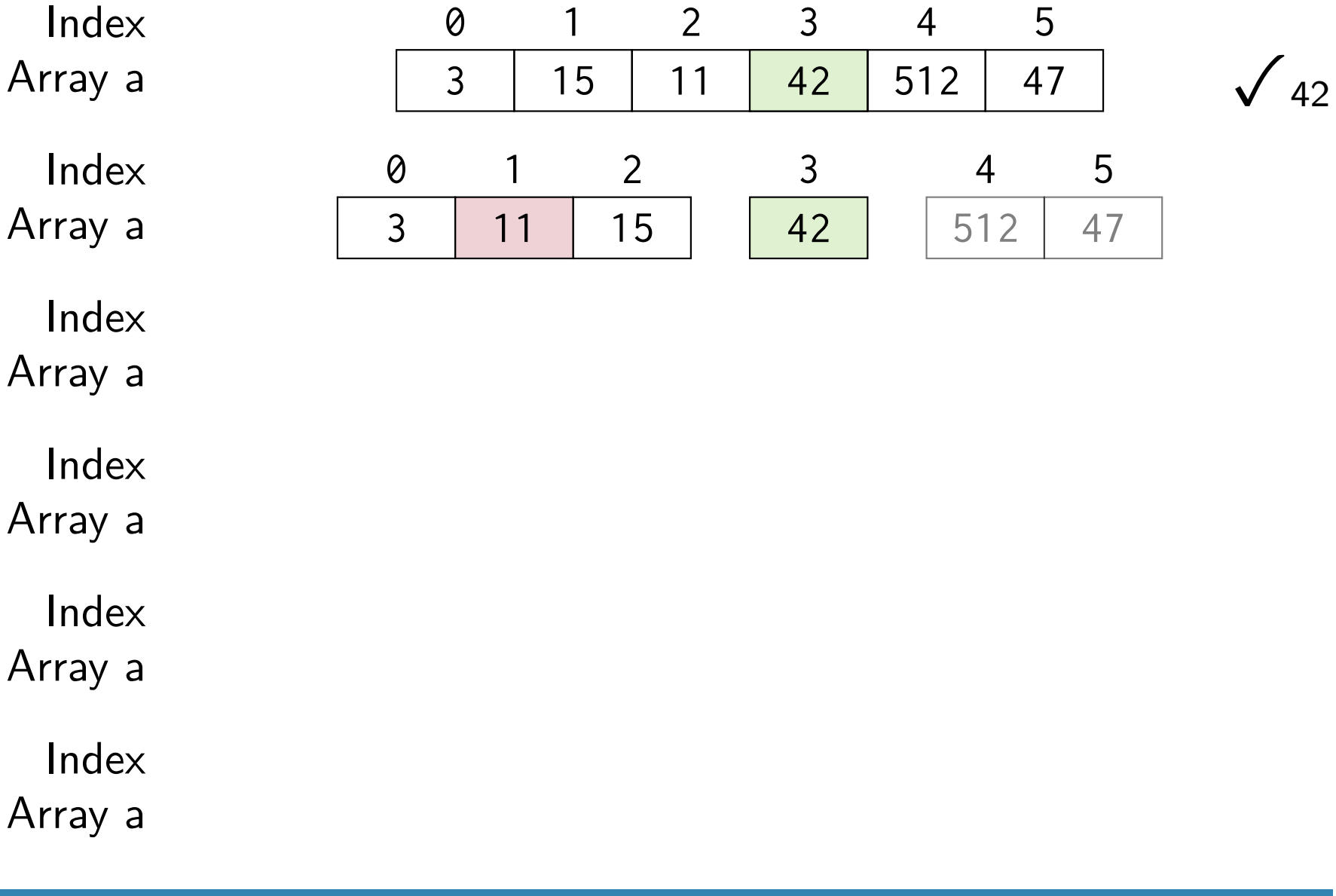

```
1  def function quicksort(array a, int low, int high):
2    if low >= high
3      return
4    bound = arr[high]
5    idx_l = low, idx_r = high - 1
6    while idx_l <= idx_r
7      while idx_l <= idx_r and a[idx_l] < bound
8          idx_l += 1
9      while idx_l <= idx_r and a[idx_r] >= bound
10         idx_r -= 1
11     if idx_l < idx_r
12         swap(a, idx_l, idx_r)
13   swap(a, idx_l, high)
14   quicksort(a, low, idx_l - 1)
15   quicksort(a, idx_l + 1, high)
```

1. Abbruchbedingung
2. Intialisierung
3a. Durchlaufe Array
3b. Vergleiche Elemente mit Pivot
3c. Tausche Elemente
4. Positioniere Pivot
5. Rekursion

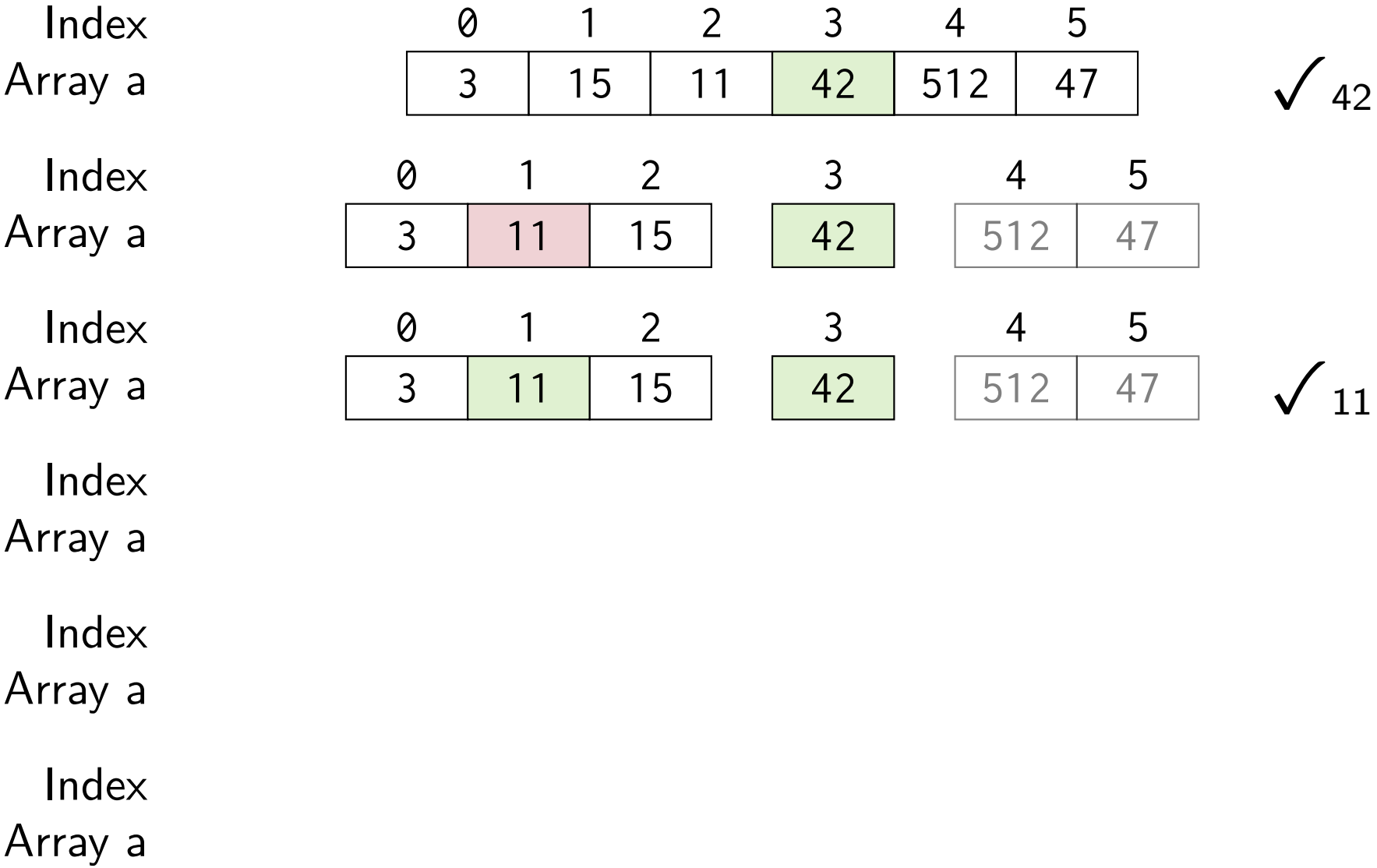
Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



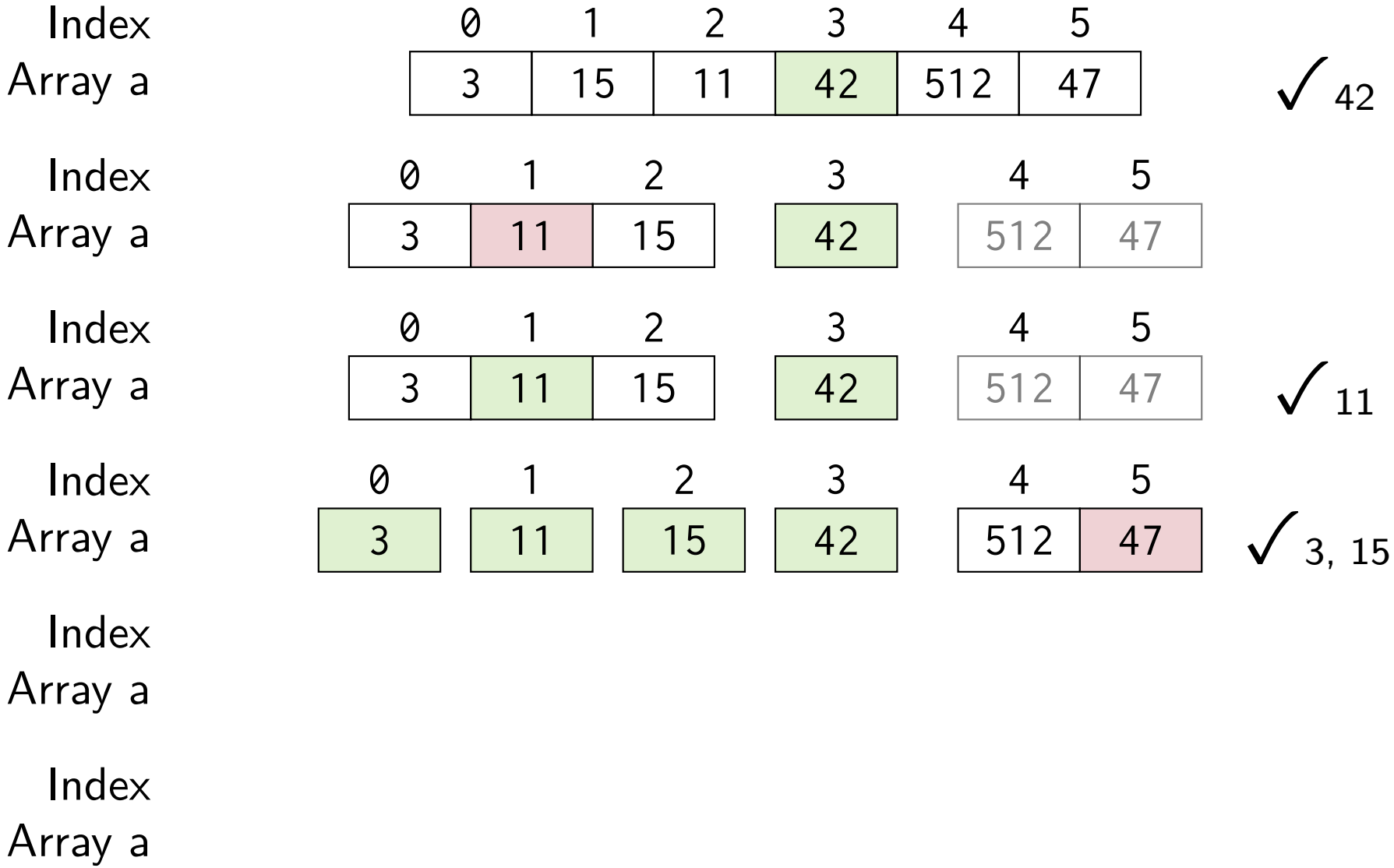
Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



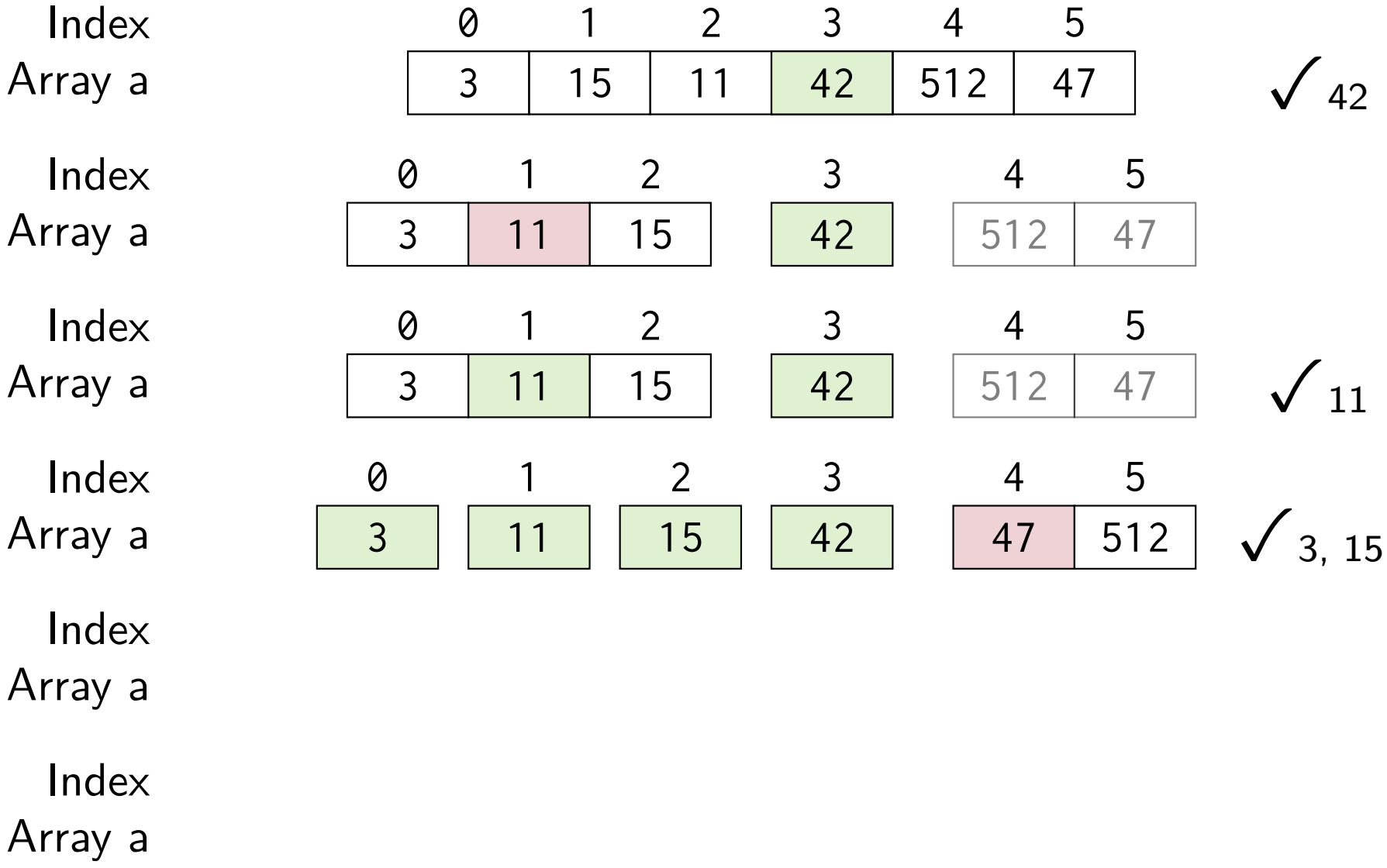
Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



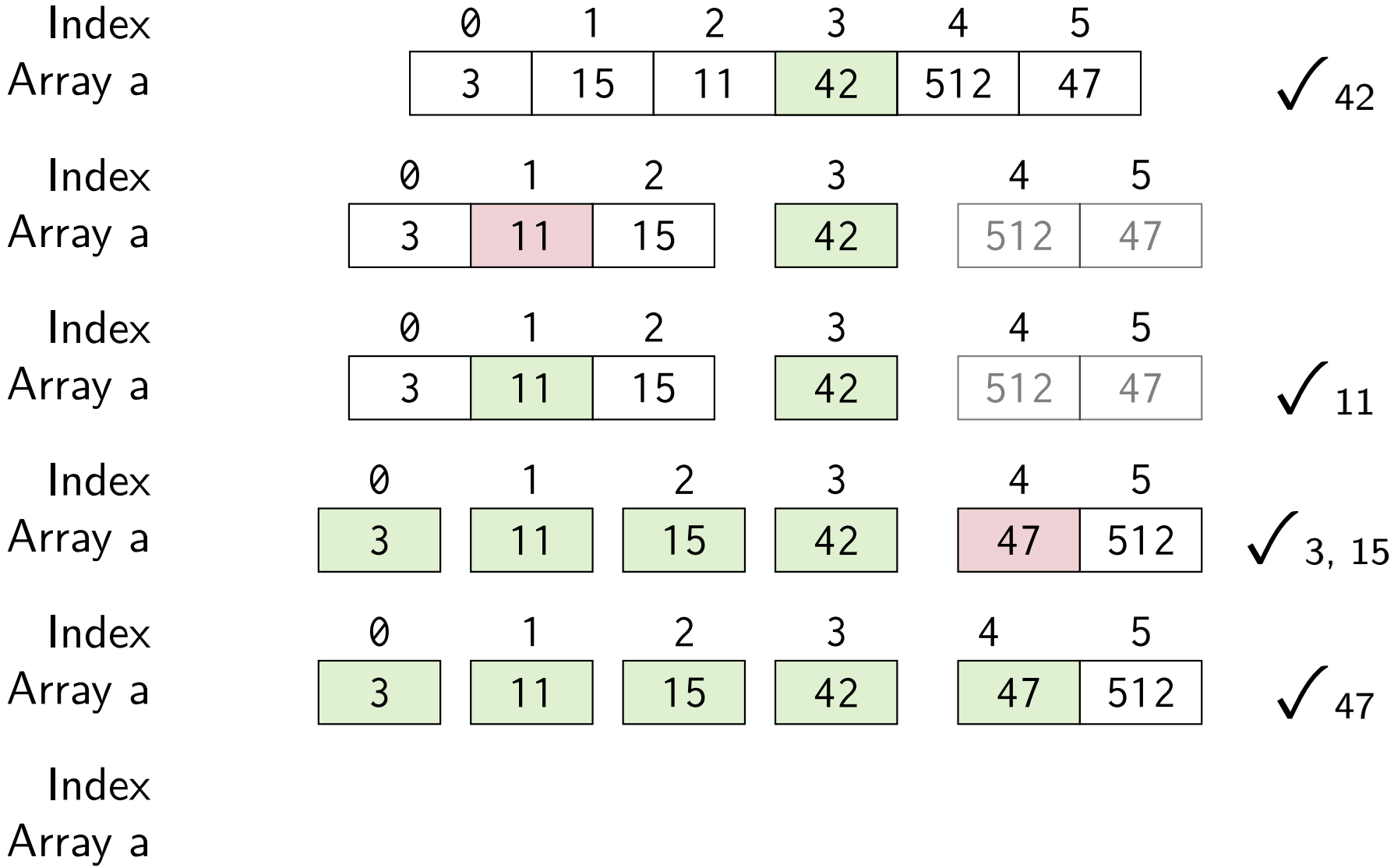
Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



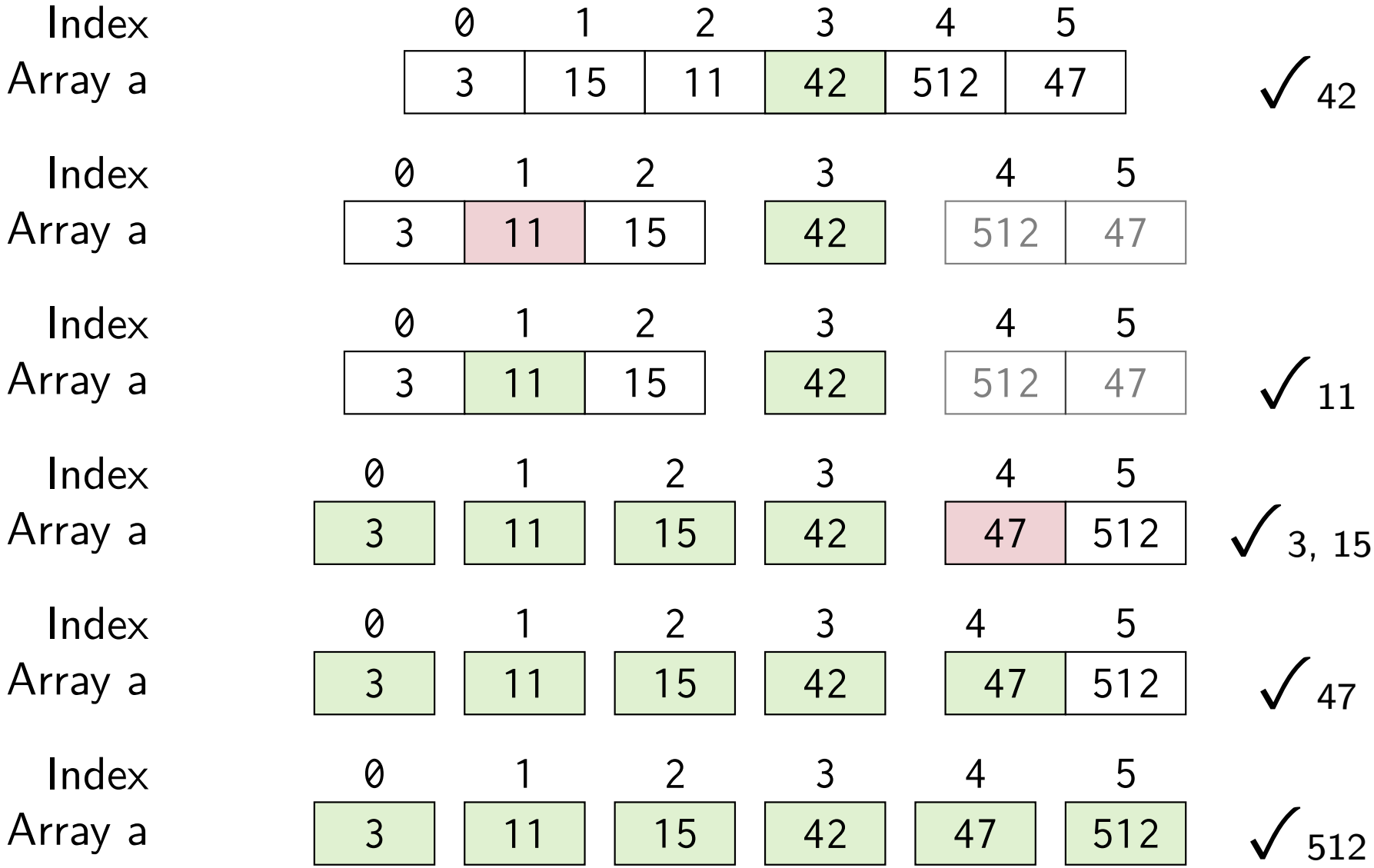
Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



Quicksort: Exemplarisches Beispiel, Rekursion



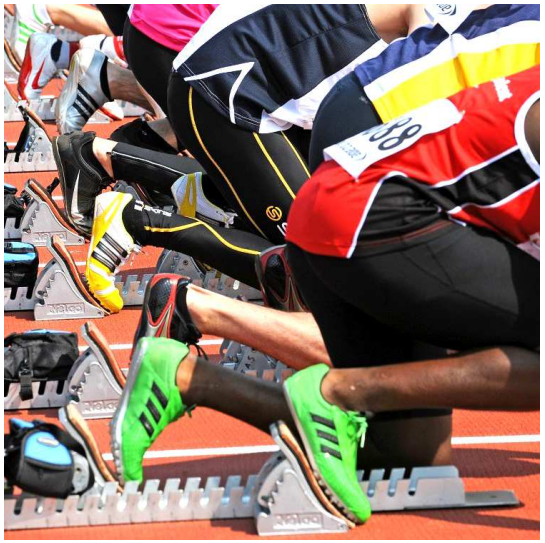
Agenda

1. Motivation ✓
2. Funktionsprinzip und Implementierung ✓
3. Nicht-funktionale Eigenschaften
4. Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

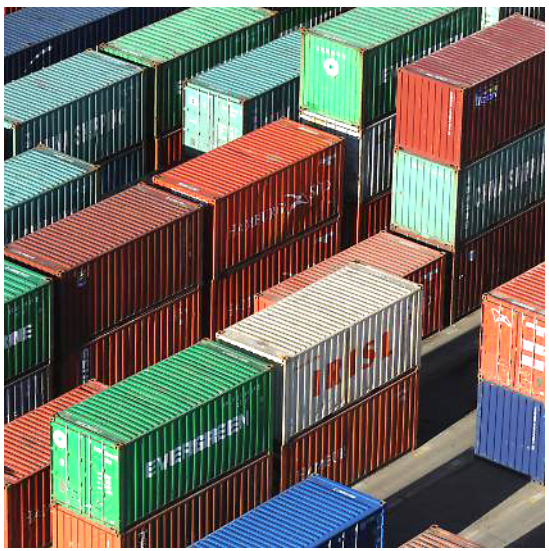
Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort

Laufzeit

- durchschnittlich $\mathcal{O}(n \log(n))$ Vergleiche
  ↪ Rekursionstiefe: $\log(n)$, je n Elemente
- im schlechtesten Fall $\mathcal{O}(n^2)$
  ↪ Laufzeit steigt quadratisch zur Eingabe



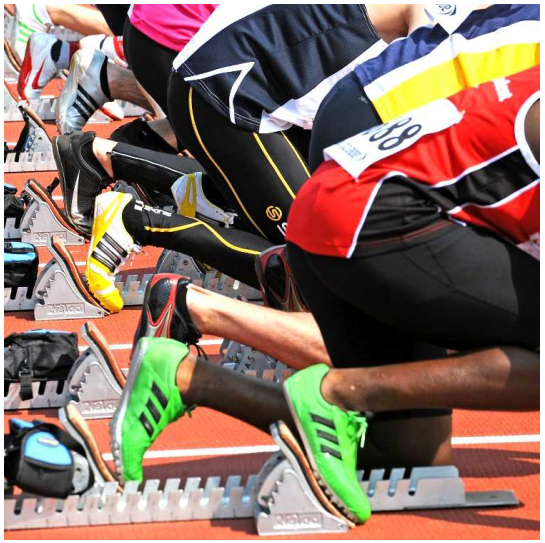
Speicherplatz



Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort

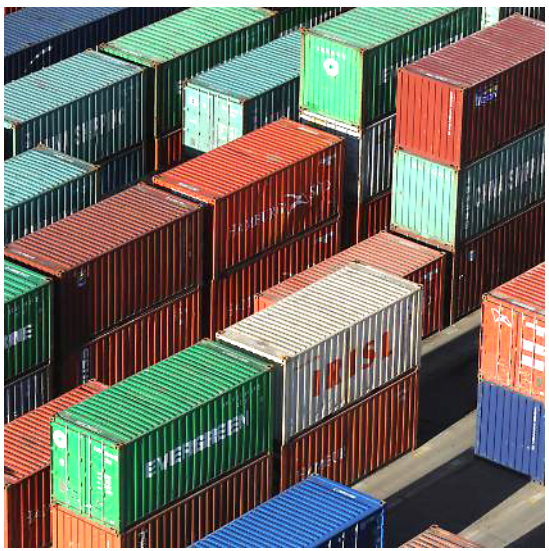
Laufzeit

- durchschnittlich $\mathcal{O}(n \log(n))$ Vergleiche
  ↪ Rekursionstiefe: $\log(n)$, je n Elemente
- im schlechtesten Fall $\mathcal{O}(n^2)$
  ↪ Laufzeit steigt quadratisch zur Eingabe



Speicherplatz

- Speicherbedarf (Stapelspeicher) hängt von der jeweiligen Implementierung ab
  ↪ rekursiv: hoch
  ↪ iterativ: niedrig



Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort

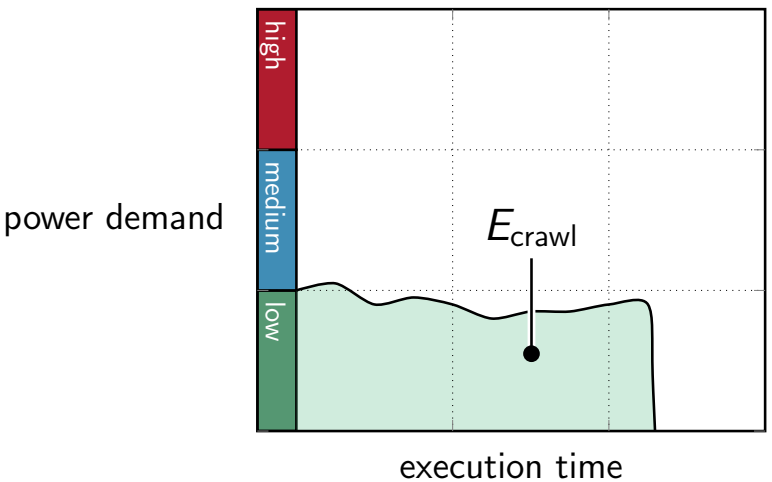
Energiebedarf

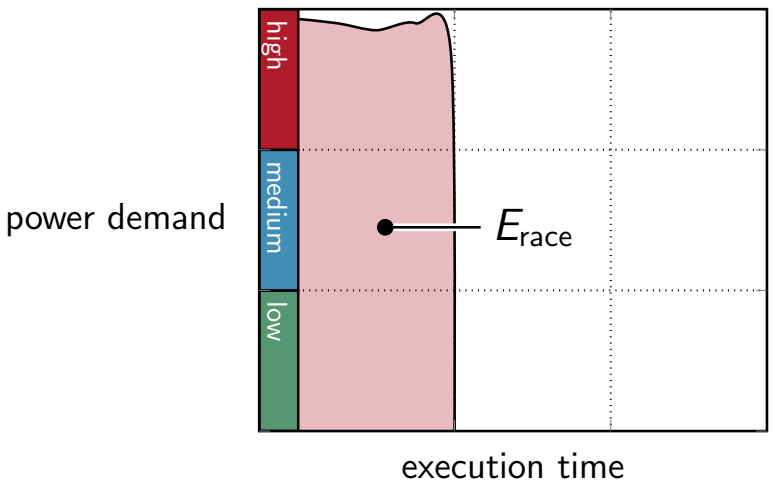
- externe Einflussfaktoren
  - Eingabegröße → Laufzeit
  - System → Speicher- vs. CPU-Zeit
- implementierungsspezifische Faktoren
  - hardwareabhängige Spezialbefehle
  - systemspezifische Energiesparmethoden

Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort

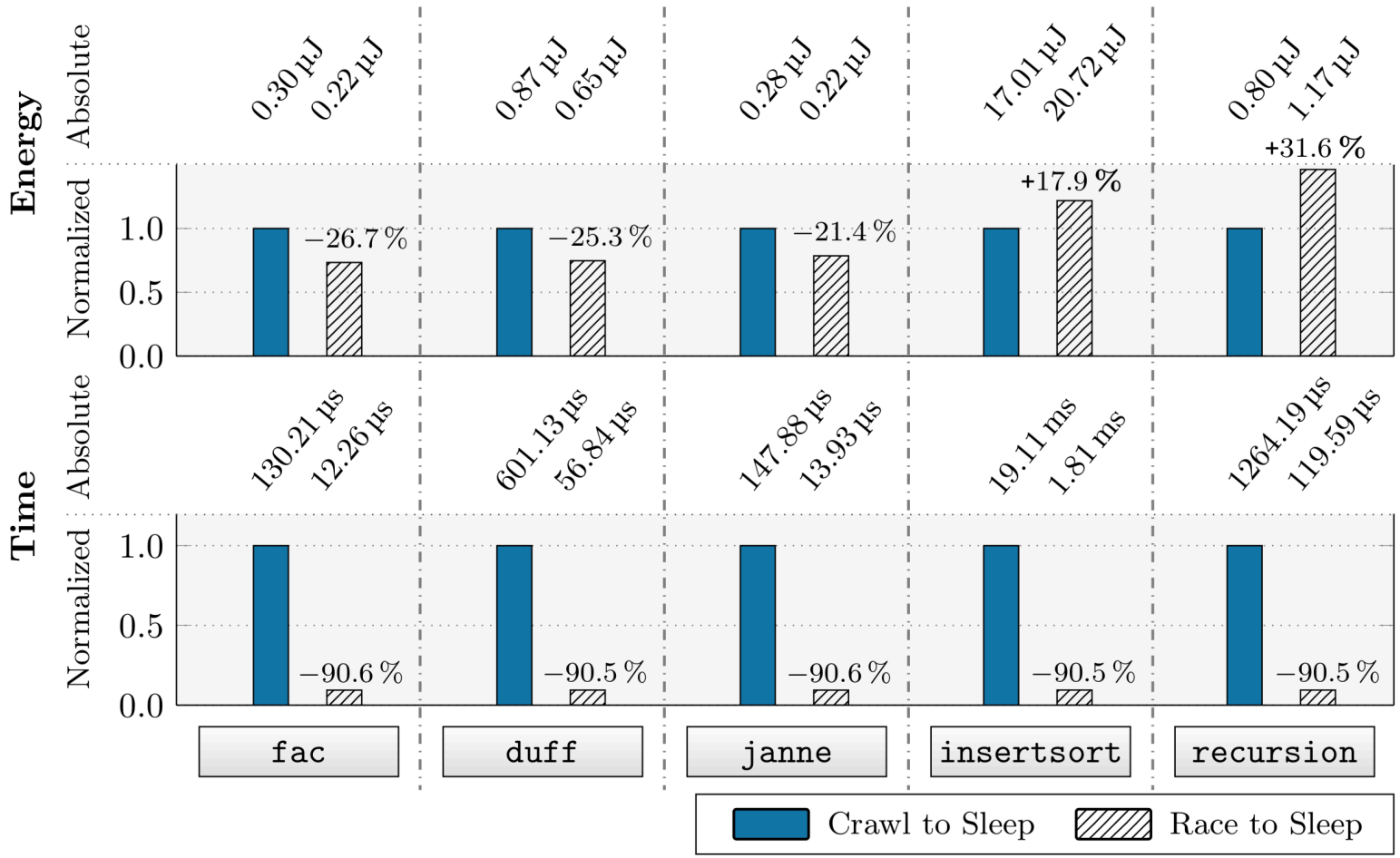
Energiebedarf

- externe Einflussfaktoren
  - Eingabegröße → Laufzeit
  - System → Speicher- vs. CPU-Zeit
- implementierungsspezifische Faktoren
  - hardwareabhängige Spezialbefehle
  - systemspezifische Energiesparmethoden



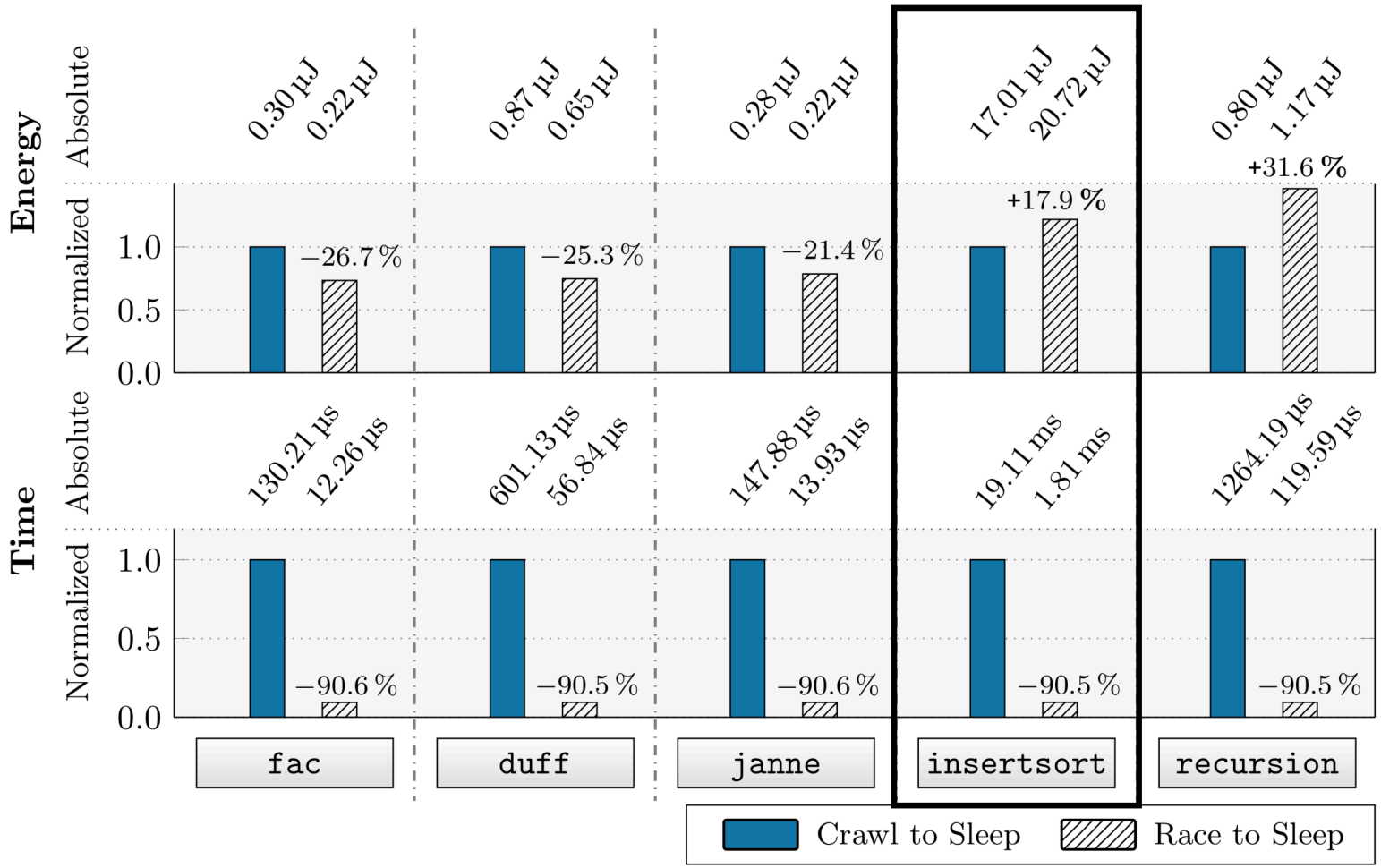


Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort



System: ARM Cortex-M0+, Speicher: 4 KB RAM, CPU: max. 48 MHz

Nicht-funktionale Eigenschaften von Quicksort



System: ARM Cortex-M0+, Speicher: 4 KB RAM, CPU: max. 48 MHz

Agenda

1. Motivation ✓
2. Funktionsprinzip und Implementierung ✓
3. Nicht-funktionale Eigenschaften ✓
4. Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Quicksort: Vergleich mit anderen Sortieralgorithmen

Algorithmus	**Best-Case**	**Average-Case**	**Worst-Case**	**Speicherbedarf**
Bubblesort	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(1)$
Heapsort	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(1)$
Insertionsort	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(1)$
Mergesort	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n)$
Quicksort	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n \log(n))$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(1)/\mathcal{O}(\mathit{logn})$
Selectionsort	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(1)$

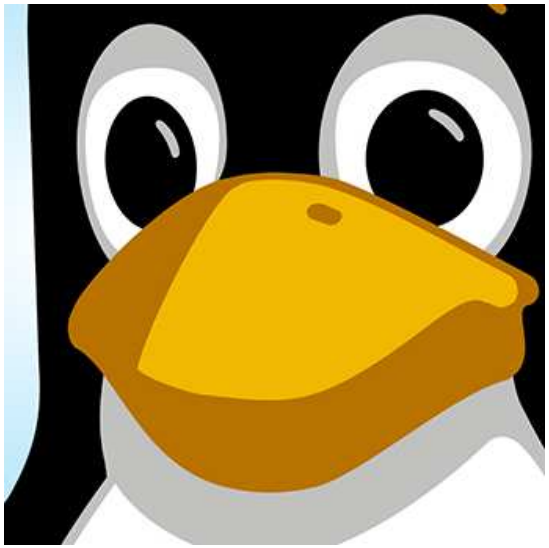
Tabelle: Vergleich unterschiedlicher Sortieralgorithmen

Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Vergleich und Bewertung

- Quicksort: Average-Case vs. Worst-Case
  ↪ auf effiziente Implementierung achten
- Erweiterungen, spezialisierte Algorithmen
  ↪ Parallelisierung, Spezialbefehle

Praktische Anwendung



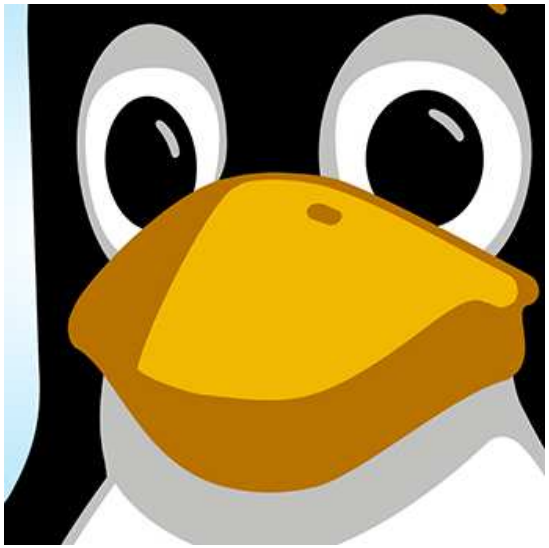
Vergleich, Bewertung und praktische Anwendung

Vergleich und Bewertung

- Quicksort: Average-Case vs. Worst-Case
  ↪ auf effiziente Implementierung achten
- Erweiterungen, spezialisierte Algorithmen
  ↪ Parallelisierung, Spezialbefehle

Praktische Anwendung

- Bibliotheken und Laufzeitsysteme bieten Referenzimplementierungen
  ↪ Maßschneiderung, Anwendungsfall
  ↪ Linux: Heapsort, Worst-Case-Verhalten

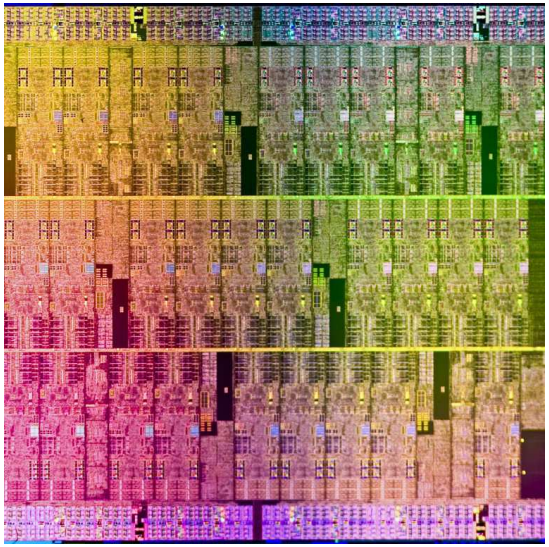


Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Quicksort Sortieralgorithmus
- effizienter Algorithmus bei...
  - ↪ unsortierten Daten
  - ↪ guter Pivotisierung

Ausblick



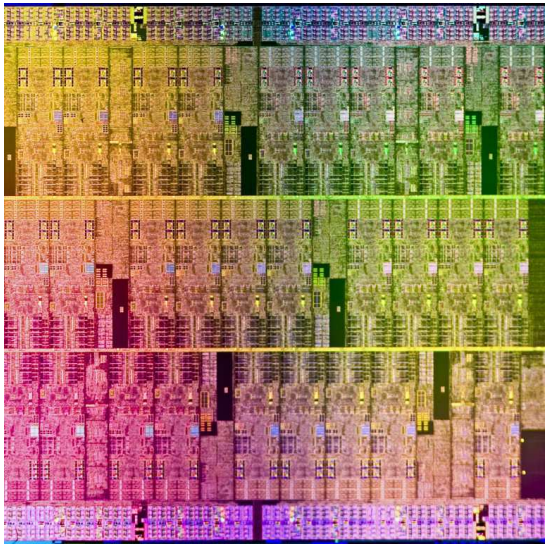
Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Quicksort Sortieralgorithmus
- effizienter Algorithmus bei...
  - ↪ unsortierten Daten
  - ↪ guter Pivotisierung

Ausblick

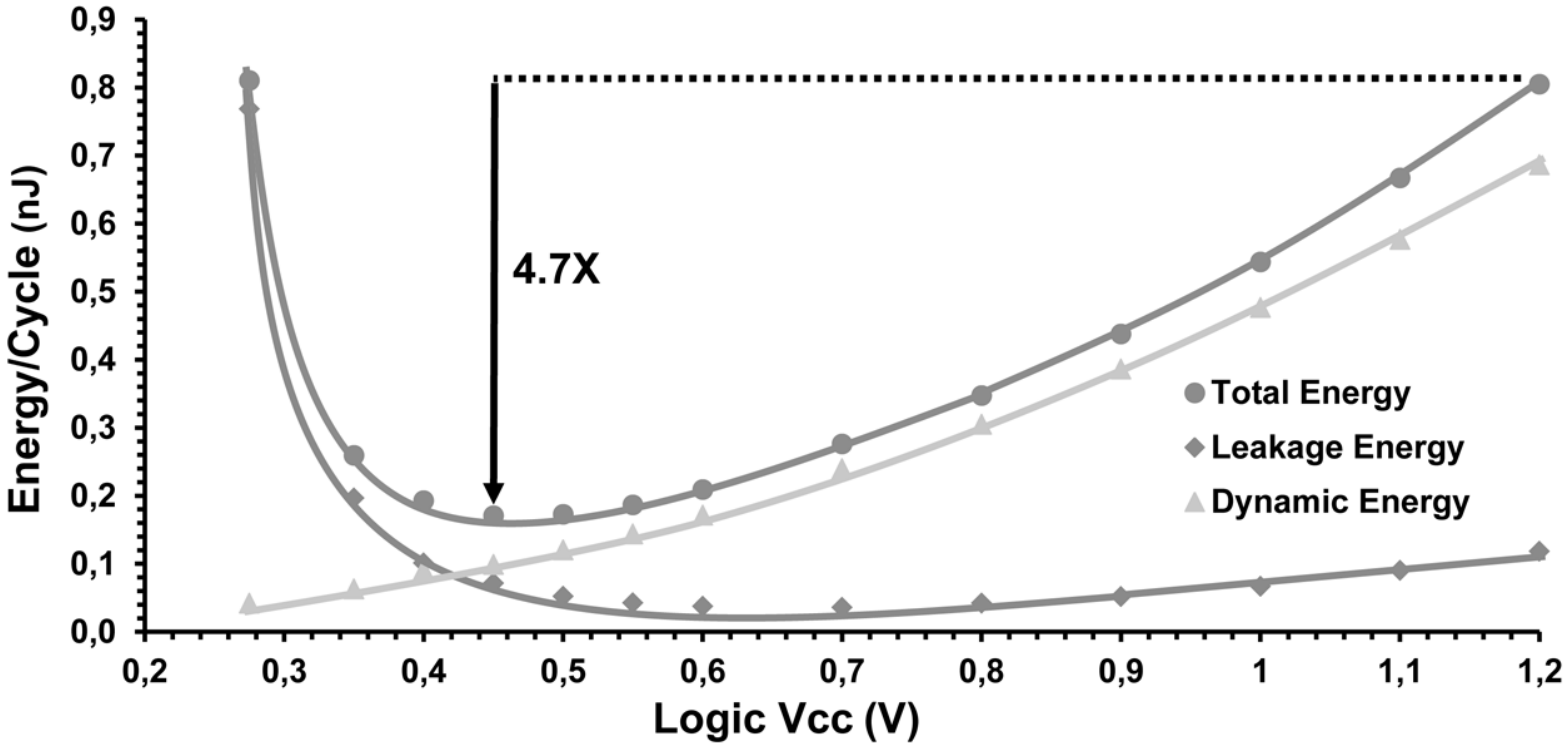
- Parallelisieren
  - ↪ mit mehreren Prozessoren sortieren
- alternative Verarbeitungseinheiten
  - ↪ GPU, FPGA



Diskussion

Vertiefungsfolien

Leckstrom in MOS-Schaltungen



- Shailendra Jain, Surhud Khare, Satish Yada et al.
  A 280mV-to-1.2V Wide-Operating-Range IA-32 Processor in 32 nm CMOS
  IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2012.

Symbolische Ausführung mit Annotationen

```c
#include <fibonacci.h>

/* @mera: #mode=strict
 *        #func=foo
 *        #para=i
 */

uint32 bar (uint32 i)
{
  if (i > 0)
    return fibonacci(i);
  return -1;
}

uint32 foo (uint32 i)
{
  uint32 res;
  /* @mera: #i=42 */
  res = bar(i);
  /* @arem */
  return res;
}
/* @arem */
```

(a) Strict Mode

```c
#include <fibonacci.h>

/* @mera: #mode=immersive
 *        #func=*
 *        #para=*
 */

uint32 bar (uint32 i)
{
  if (i > 0)
    return fibonacci(i);
  return -1;
}

uint32 foo (uint32 i)
{
  uint32 res;

  res = bar(i);

  return res;
}
/* @arem */
```

(b) Immersive Mode

```c
#include <fibonacci.h>

/* @mera: #mode=managed
 *        #func=foo
 *        #para=i
 */

uint32 bar (uint32 i)
{
  if (i > 0)
    return fibonacci(i);
  return -1;
}

uint32 foo (uint32 i)
{
  uint32 res;
  /* @mera: #i={1,42} */
  res = bar(i);
  /* @arem */
  return res;
}
/* @arem */
```

(c) Managed Mode

- Koushik Sen, Haruto Tanno et al.
  GuideSE: Annotations for Guiding Concolic Testing
  AST'15 / 37th International Conference on Software Engineering (ICSE 2015), 2012.

Basisblock, Übersetzeroptimierungen

```
1  main.entry:
2    push r7, lr
3    mov r7, sp
4    sub sp, 16
5    movs r0, 0
6    str r0, [sp,12]
7    str r0, [sp,4]
8    movs r1, 5
9    str r1, [sp,0]
10   str r0, [sp,8]
11   b.n label
```

(a) Level `O0`

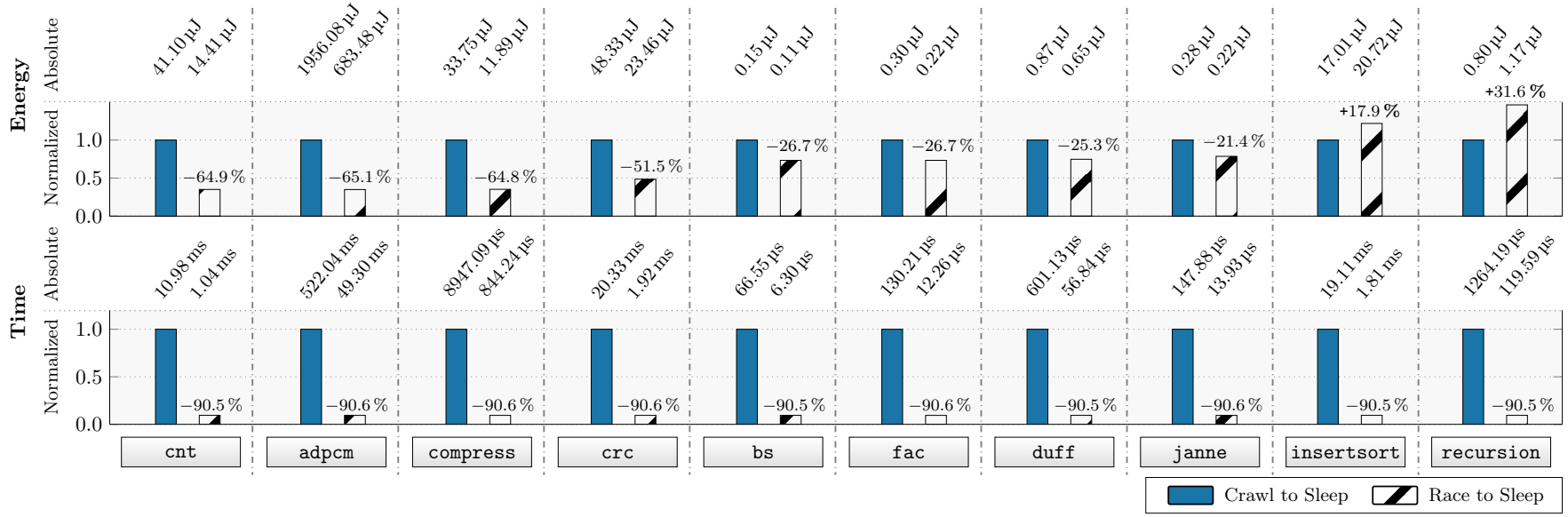
```
1  main.entry:
2    sub sp, 4
3    movs r0, 5
4    str r0, [sp,0]
5    ldr r0, [sp,0]
6    cmp r0, 0
7    ittt lt
8    movlt r0, 0
9    addlt sp, 4
10   bxlt lr
11
```

(b) Level `O3`

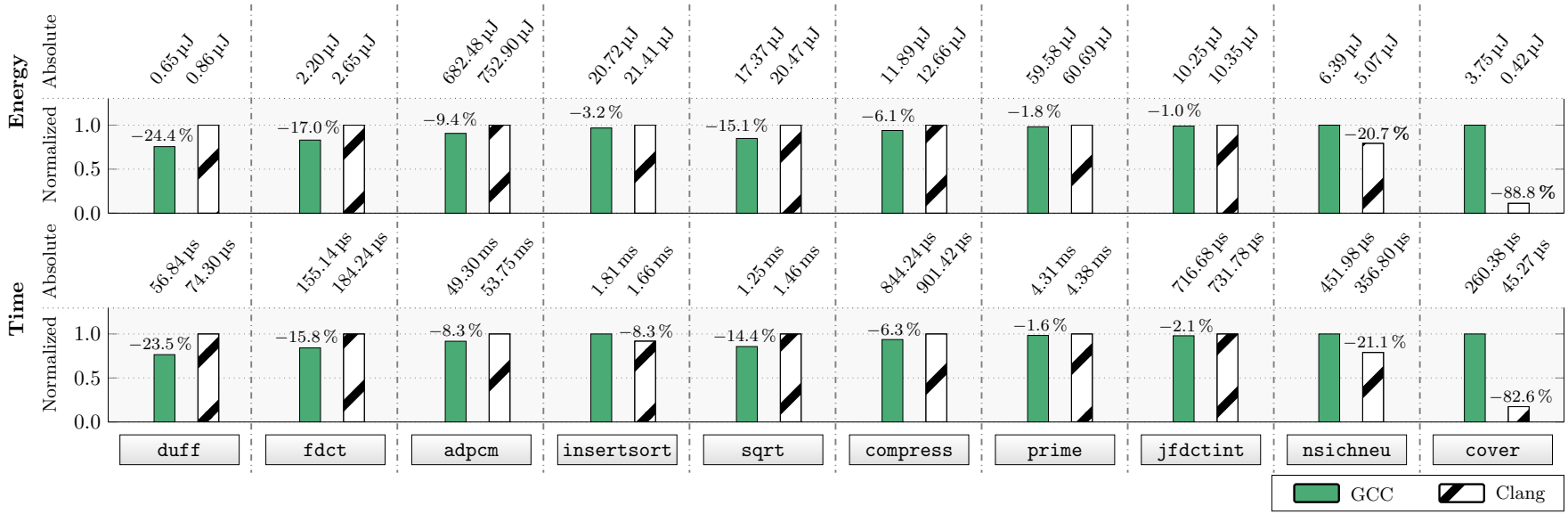
```
1  main.entry:
2    sub sp, 4
3    movs r0, 5
4    str r0, [sp,0]
5    ldr r0, [sp,0]
6    blt.n label
7
8
9
10
11
```

(c) Level `Os`

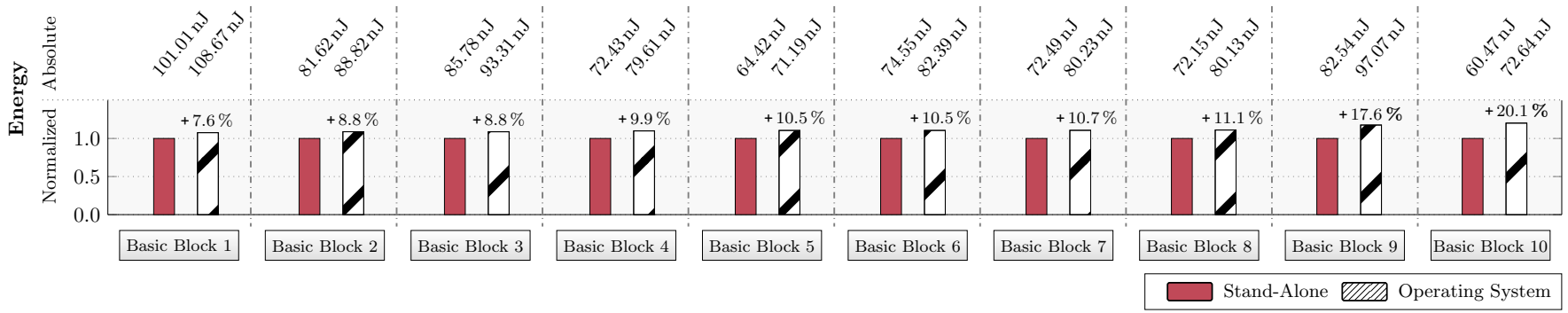
Laufzeit vs. Energiebedarf (DVFS)



Laufzeit vs. Energiebedarf (Übersetzer)

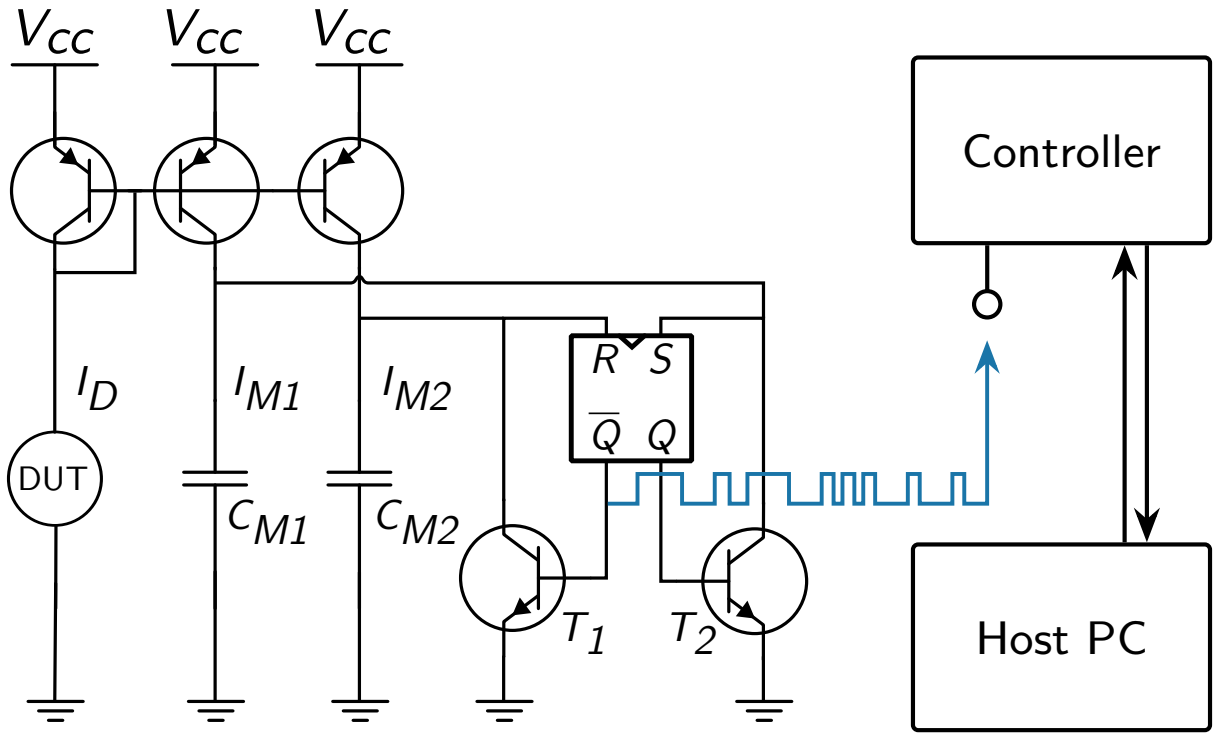


Betriebssystem: Hintergrundrauschen

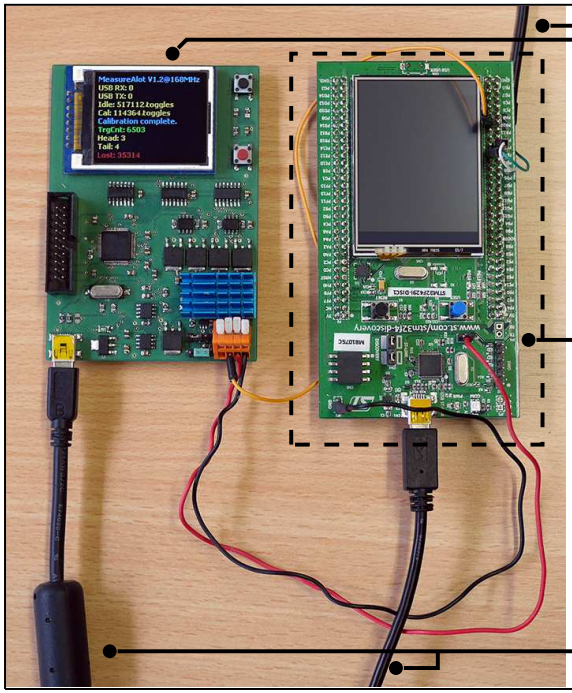


Stromspiegel-Messschaltung

Messschaltung: Funktionsschaltbild



Messschaltung: MCU-Platine



① Kontrollschnittstelle (Serielle Schnittstelle)
→ synchronisieren mit Wirts-PC
→ abrufen von Applikationsinformationen

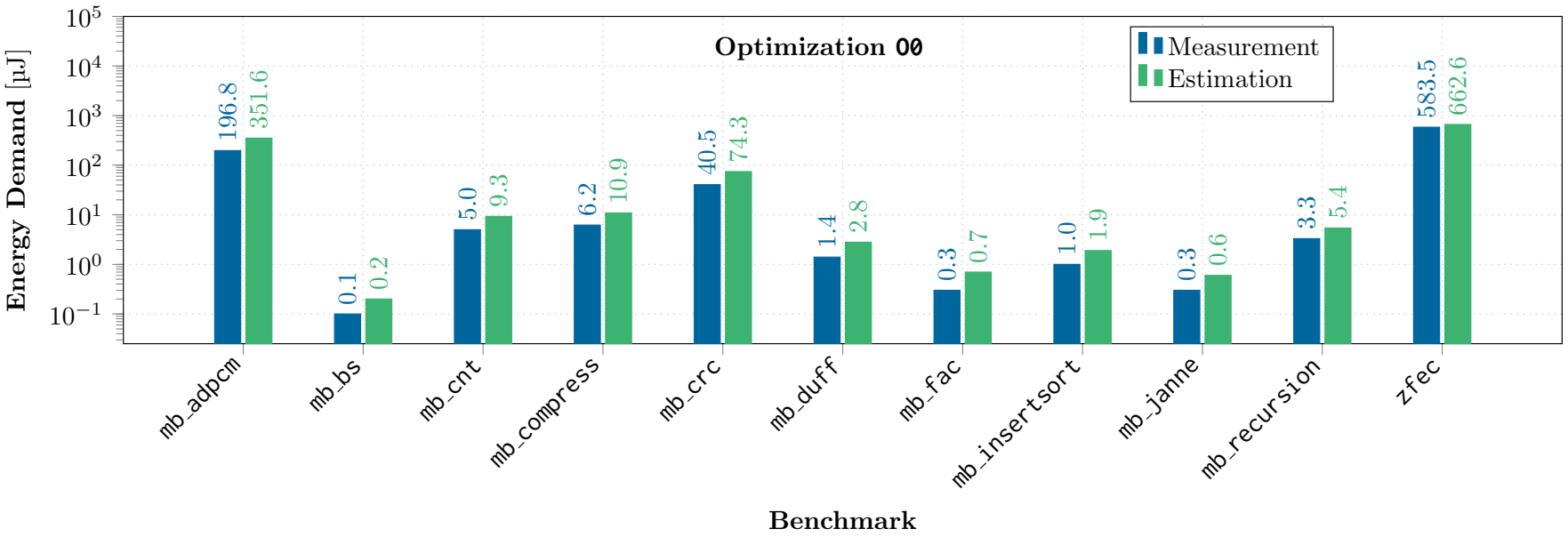
② Messinstrument (MeasureAlot)
→ Stromspiegel
→ Zählung von Kondensatorladevorgängen

③ Vermessenes Gerät (ST STM32F429 Discovery)
→ ARM Cortex-M4
→ dreistufige Verarbeitungsleitung

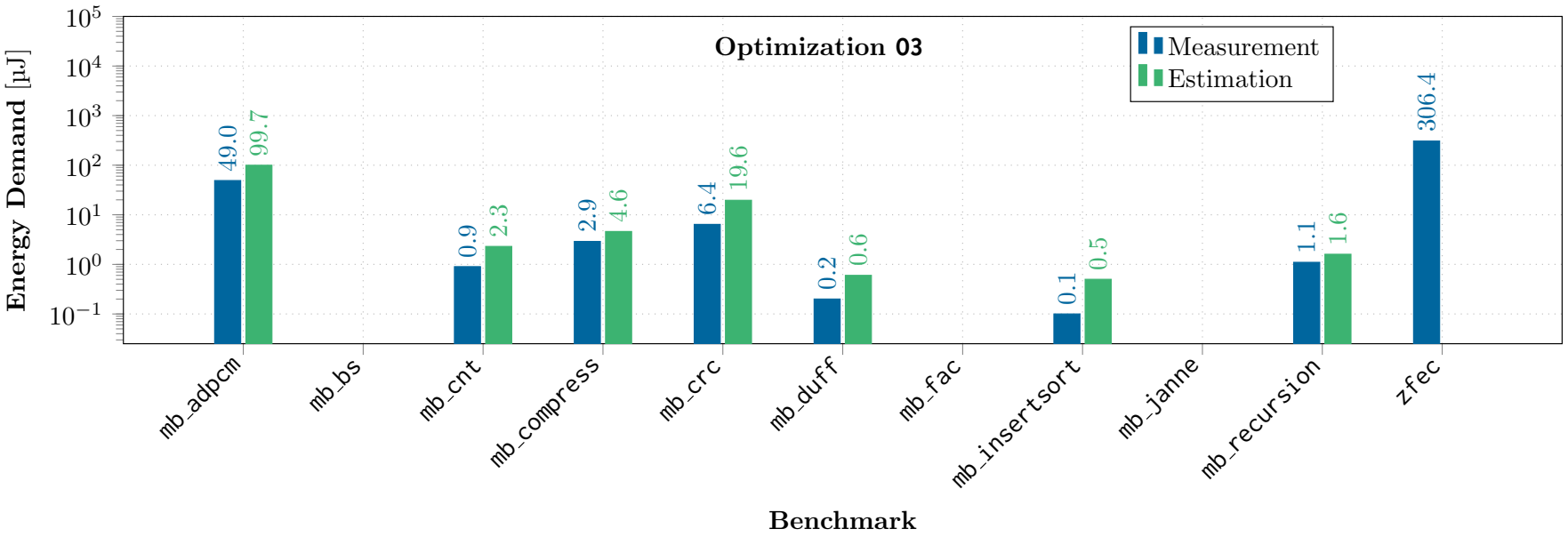
④ Datenübertragung, Stromversorgung (2 x 5 V DC)

Artificial Neural Network

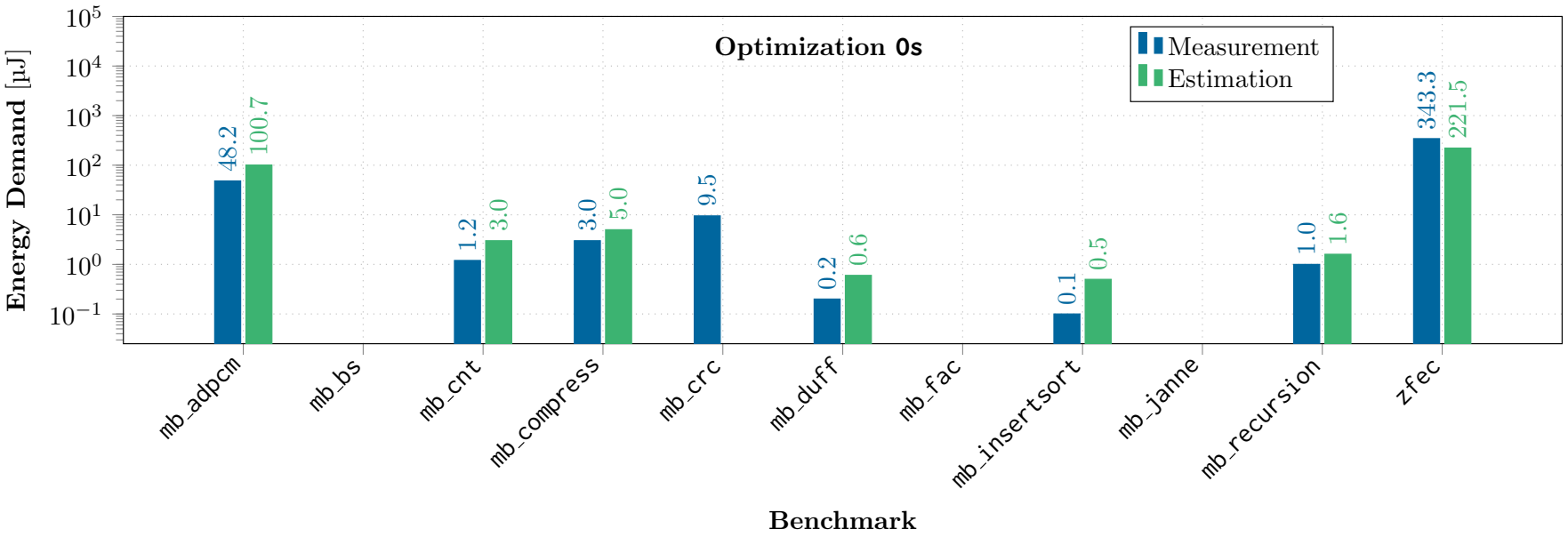
Energiebedarfsvorhersagen mit neuronalem Netzwerk (-O0)



Energiebedarfsvorhersagen mit neuronalem Netzwerk (-O3)



Energiebedarfsvorhersagen mit neuronalem Netzwerk (-Os)

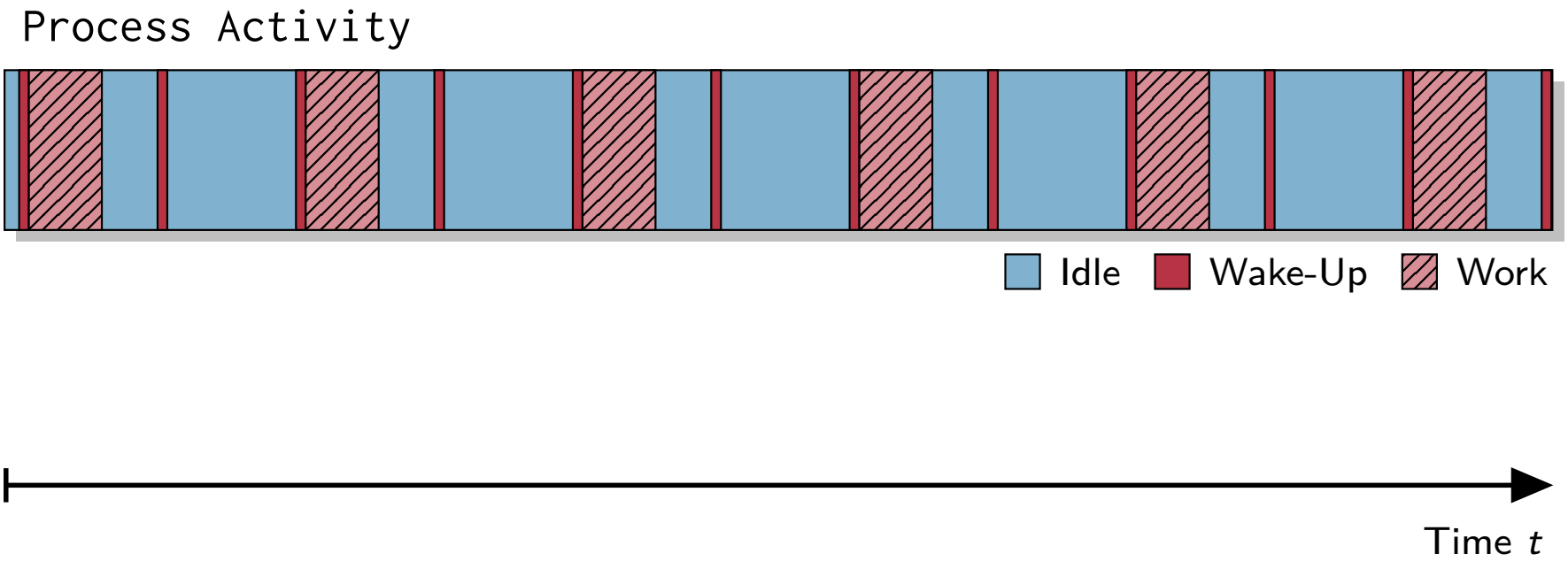


Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation

- Statistics at process level (e.g., PowerTOP), unit of measurement is *wake-ups per second*
- Wake-ups cause the CPU to return from C-state, subsequent activities (e.g., I/O) are likely to follow
- Less wake-ups → lower energy consumption

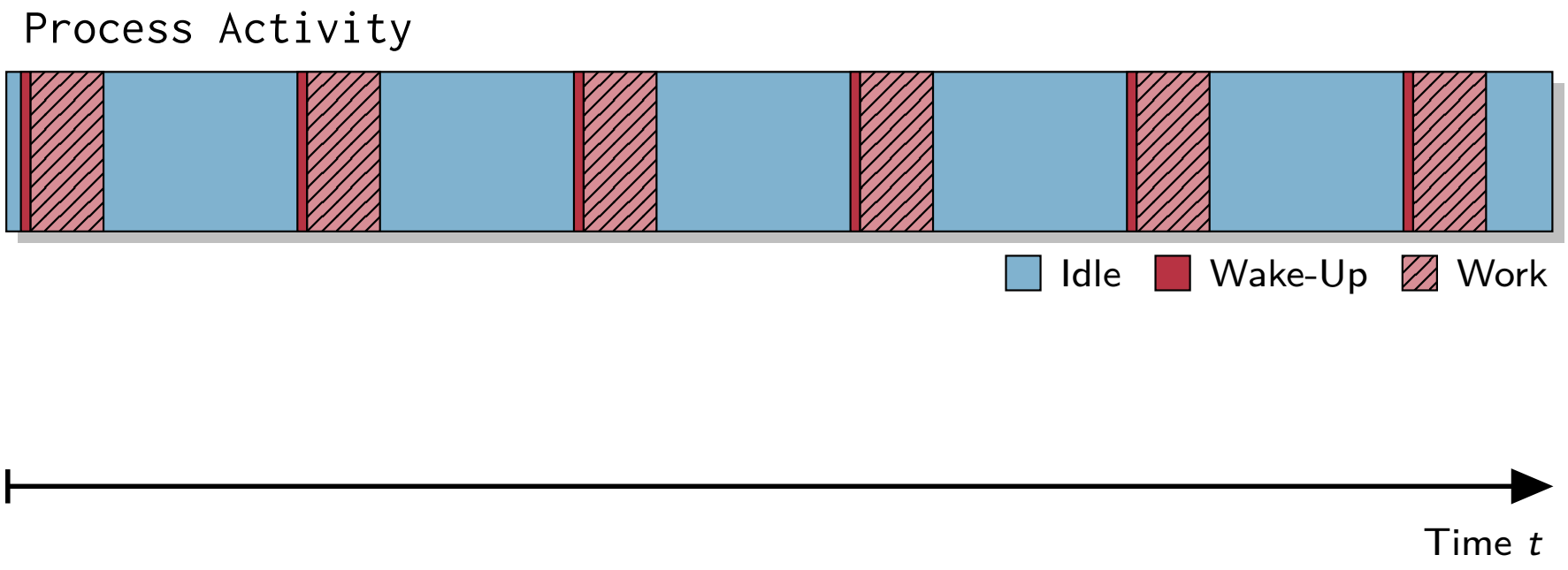
Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation

- Statistics at process level (e.g., PowerTOP), unit of measurement is *wake-ups per second*
- Wake-ups cause the CPU to return from C-state, subsequent activities (e.g., I/O) are likely to follow
- Less wake-ups → lower energy consumption



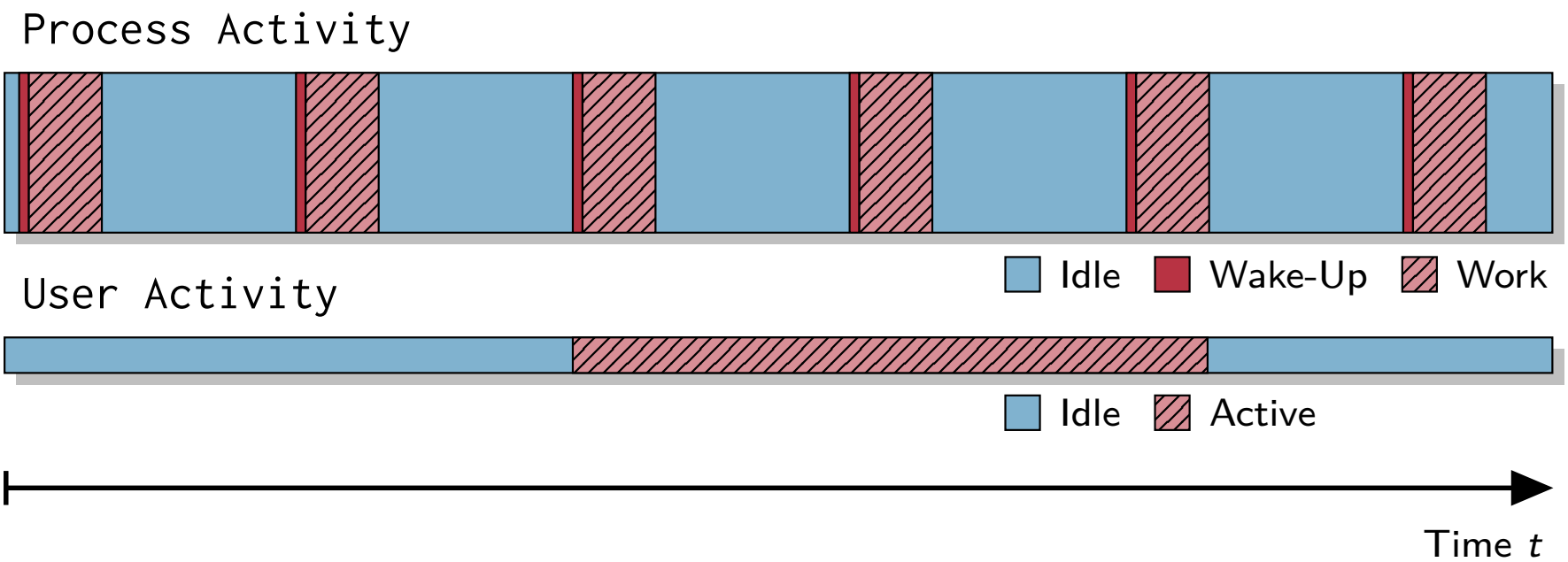
Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation

- Statistics at process level (e.g., PowerTOP), unit of measurement is *wake-ups per second*
- Wake-ups cause the CPU to return from C-state, subsequent activities (e.g., I/O) are likely to follow
- Less wake-ups → lower energy consumption



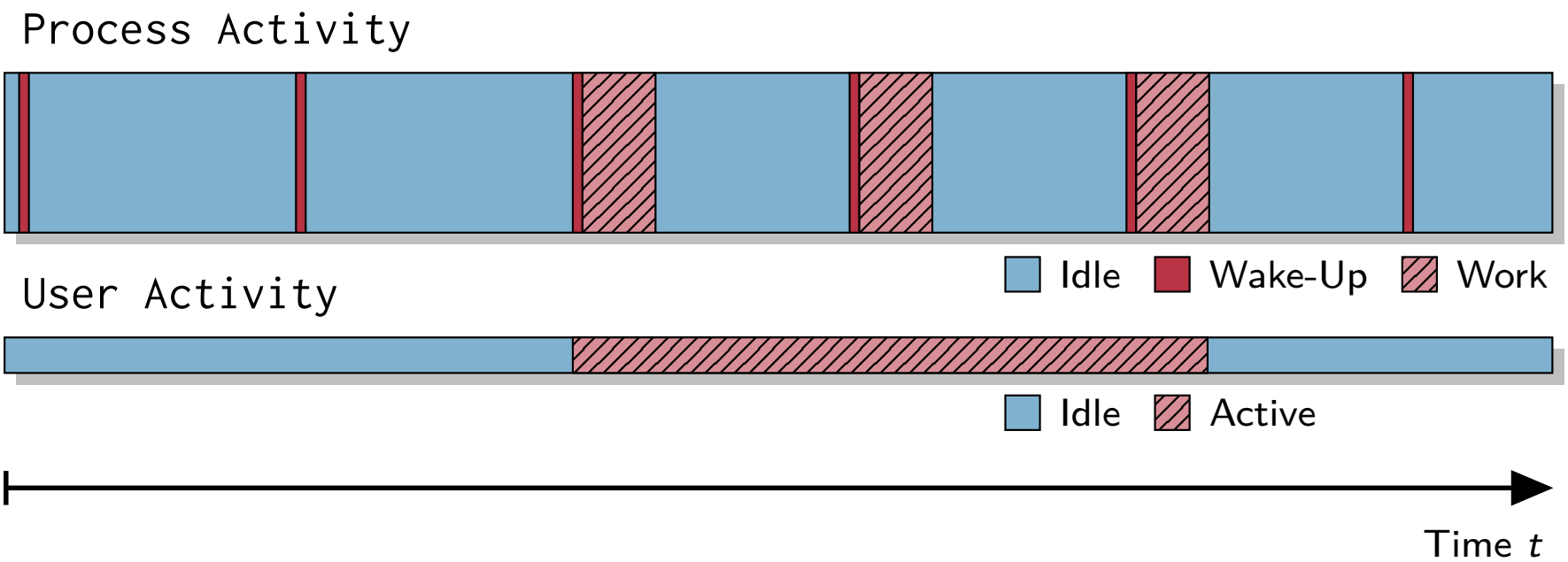
Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation

- Statistics at process level (e.g., PowerTOP), unit of measurement is *wake-ups per second*
- Wake-ups cause the CPU to return from C-state, subsequent activities (e.g., I/O) are likely to follow
- Less wake-ups → lower energy consumption

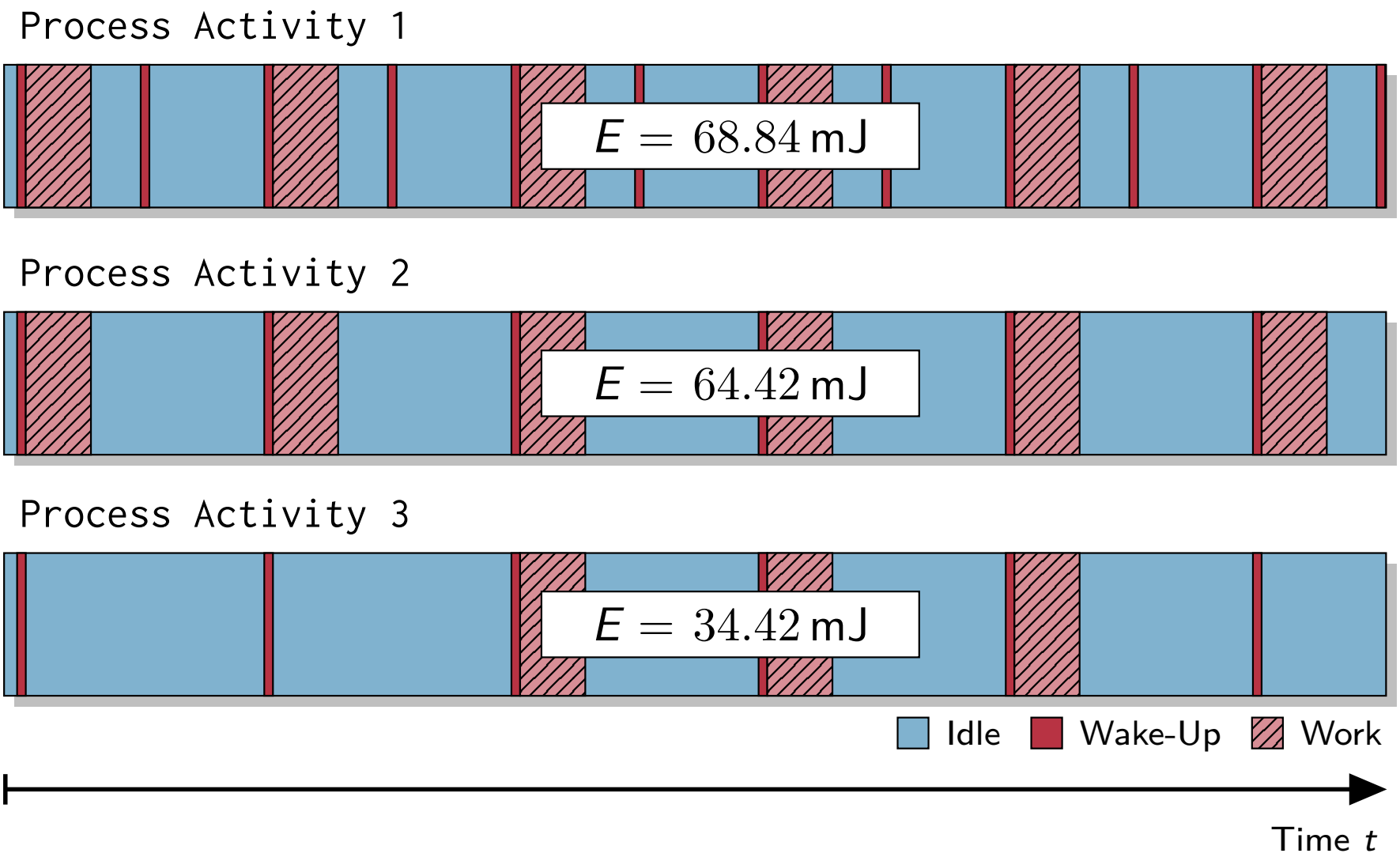


Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation

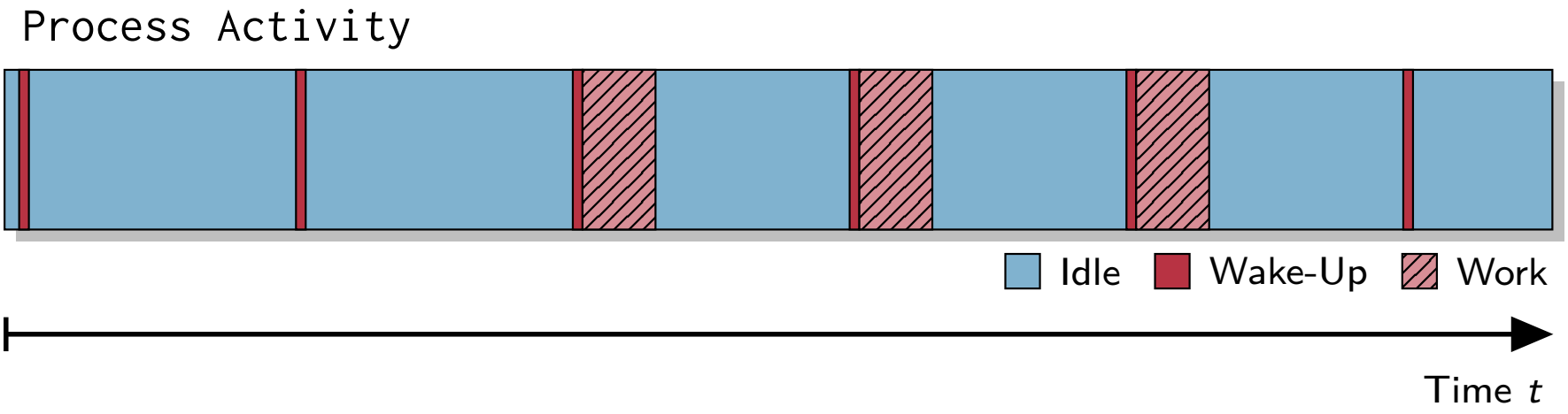
- Statistics at process level (e.g., PowerTOP), unit of measurement is *wake-ups per second*
- Wake-ups cause the CPU to return from C-state, subsequent activities (e.g., I/O) are likely to follow
- Less wake-ups → lower energy consumption

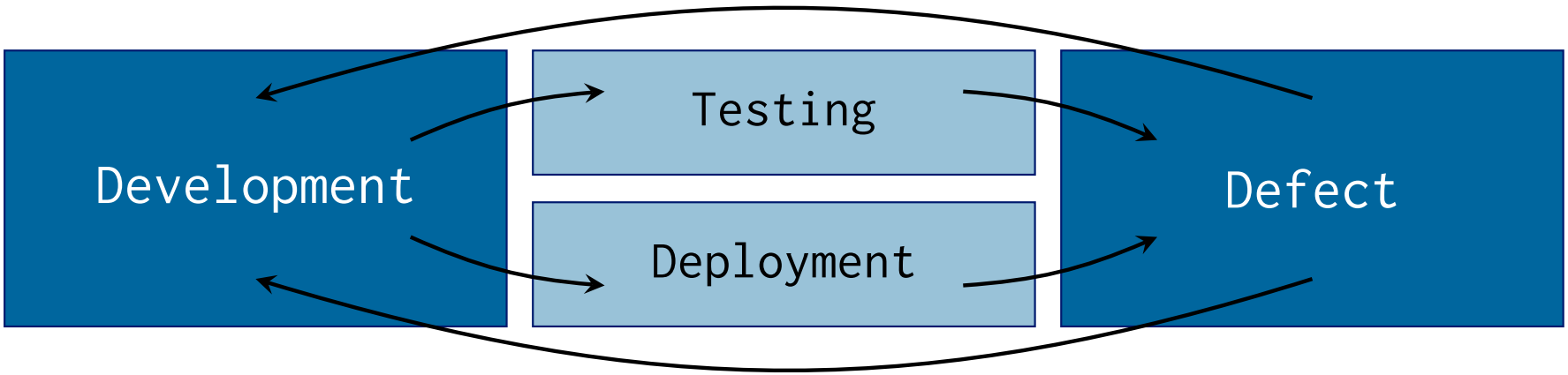


Energy-Aware Systems: Low-Energy Optimisation



Low-Energy Optimisation: Backward-Looking Approach





Low-Energy Optimisation: Forward-Looking Approach