

Systemprogrammierung

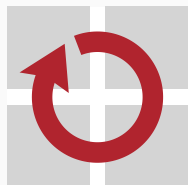
Grundlagen von Betriebssystemen

Teil B – V.1 Rechnerorganisation: Virtuelle Maschinen

16. Mai 2023

Rüdiger Kapitza

(© Wolfgang Schröder-Preikschat, Rüdiger Kapitza)



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Agenda

Einführung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Fallstudie

Mehrebenenmaschinen

Maschinenhierarchie

Maschinen und Prozessoren

Entvirtualisierung

Ausnahmesituation

Zusammenfassung

Einführung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Fallstudie

Mehrebenenmaschinen

Maschinenhierarchie

Maschinen und Prozessoren

Entvirtualisierung

Ausnahmesituation

Zusammenfassung

- Rechensysteme als eine **Schichtenfolge** von Maschinen
 - die eine **funktionale Hierarchie** [7] von spezifischen Maschinen zur Ausführung von Programmen darstellt
 - wobei manche dieser Maschinen nicht in Wirklichkeit vorhanden sind, sein müssen oder sein können
 - die somit jeweils als eine **virtuelle Maschine** [11] in Erscheinung treten

- **Abstraktionshierarchie** für Rechengsystemkonstruktionen verstehen
 - in der die einzelnen Schichten durch **Prozessoren** implementiert werden, die vor (*off-line*) oder zur (*on-line*) Programmausführungszeit wirken
 - wobei ein Prozessor als **Übersetzer** oder **Interpreter** ausgelegt ist

- Platz für das **Betriebssystem** in dieser Hierarchie ausmachen
 - erkennen, dass ein Betriebssystem ein spezieller Interpreter ist und den Befehlssatz wie auch die Funktionalität einer CPU erweitert
 - die **Symbiose** insbesondere von Betriebssystem und CPU verinnerlichen

- Rechengysteme als eine **Schichtenfolge** von Maschinen
- **Abstraktionshierarchie** für Rechengystemkonstruktionen verstehen
- Platz für das **Betriebssystem** in dieser Hierarchie ausmachen
- Grundlagen eines „Weltbilds“ legen, das zentral für SP sein wird

Einführung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Fallstudie

Mehrebenenmaschinen

Maschinenhierarchie

Maschinen und Prozessoren

Entvirtualisierung

Ausnahmesituation

Zusammenfassung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Faustregel: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Quellsprache} \rightarrow \text{höheres} \\ \text{Zielsprache} \rightarrow \text{niedrigeres} \end{array} \right\}$ Abstraktionsniveau

Semantische Lücke (*semantic gap*, [14])

The difference between the complex operations performed by high-level constructs and the simple ones provided by computer instruction sets.

It was in an attempt to try to close this gap that computer architects designed increasingly complex instruction set computers.

Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Faustregel: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Quellsprache} \rightarrow \text{höheres} \\ \text{Zielsprache} \rightarrow \text{niedrigeres} \end{array} \right\}$ Abstraktionsniveau

Semantische Lücke (*semantic gap*, [14])

The difference between the complex operations performed by high-level constructs and the simple ones provided by computer instruction sets.

It was in an attempt to try to close this gap that computer architects designed increasingly complex instruction set computers.

- Kluft zwischen gedanklich Gemeintem und sprachlich Geäußertem

Schichtenstruktur

Fallstudie

Beispiel: Matrizenmultiplikation

Problemraum



(Mathematik)



Lösungsraum



(Informatik)

Beispiel: Matrizenmultiplikation

Problemraum



(Mathematik)



Lösungsraum



(Informatik)

- „gedanklich gemeint“ ist ein Verfahren aus der linearen Algebra
- „sprachlich geäußert“ auf verschiedenen Ebenen der **Abstraktion**

- Multiplikation von zwei 2×2 Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}$$

Zwei Matrizen werden multipliziert, indem die Produktsummenformel auf Paare aus einem Zeilenvektor der ersten und einem Spaltenvektor der zweiten Matrix angewandt wird.

- Multiplikation von zwei 2×2 Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}$$

Zwei Matrizen werden multipliziert, indem die Produktsummenformel auf Paare aus einem Zeilenvektor der ersten und einem Spaltenvektor der zweiten Matrix angewandt wird.

- Produktsummenformel für $C = A \times B$: $C_{i,j} = \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj}$

Ebene informatischer Sprache: C

- Skalarprodukt oder „inneres Produkt“, Quellmodul (multiply.c):

```
1  typedef int Matrix [N][N];
2
3  void multiply(in Matrix a, in Matrix b, out Matrix c) {
4      unsigned int i, j, k;
5      for (i = 0; i < N; i++)
6          for (j = 0; j < N; j++) {
7              c[i][j] = 0;
8              for (k = 0; k < N; k++)
9                  c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
10         }
11 }
```

Ebene informatischer Sprache: C

- Skalarprodukt oder „inneres Produkt“, Quellmodul (multiply.c):

```
1  typedef int Matrix [N][N];
2
3  void multiply(in Matrix a, in Matrix b, out Matrix c) {
4      unsigned int i, j, k;
5      for (i = 0; i < N; i++)
6          for (j = 0; j < N; j++) {
7              c[i][j] = 0;
8              for (k = 0; k < N; k++)
9                  c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
10         }
11 }
```

- **Konkretisierung** für zwei $N \times N$ Matrizen: $c = a \times b$
 - ausgelegt als Unterprogramm: Prozedur \mapsto C function

Ebene informatischer Sprache: C

- Skalarprodukt oder „inneres Produkt“, Quellmodul (multiply.c):

```
1  typedef int Matrix [N][N];
2
3  void multiply(in Matrix a, in Matrix b, out Matrix c) {
4      unsigned int i, j, k;
5      for (i = 0; i < N; i++)
6          for (j = 0; j < N; j++) {
7              c[i][j] = 0;
8              for (k = 0; k < N; k++)
9                  c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
10         }
11 }
```

- insgesamt sechs Varianten (d.h., Schleifenanordnungen)
 - **{ijk, jik, ikj, jki, kij, kji}**: funktional gleich, nichtfunktional ggf. ungleich

Ebene informatischer Sprache: ASM [8, 4]

```
1  .file "multiply.c"
2  .text
3  .p2align 4,,15
4  .globl multiply
5  .type multiply,@function
6  multiply:
7  pushl %ebp
8  movl %esp,%ebp
9  pushl %edi
10 pushl %esi
11 pushl %ebx
12 subl $4,%esp
13 movl 16(%ebp),%esi
14 movl $0,-16(%ebp)
15 .L2:
16 movl 8(%ebp),%edi
17 xorl %ebx,%ebx
18 addl -16(%ebp),%edi
19 .p2align 4,,7
20 .p2align 3
21 .L4:
22 movl 12(%ebp),%eax
23 xorl %edx,%edx
24 movl $0,(%esi,%ebx,4)
25 leal (%eax,%ebx,4),%ecx
26 .p2align 4,,7
27 .p2align 3
28 .L3:
29 movl (%ecx),%eax
30 addl $400,%ecx
31 imull (%edi,%edx,4),%eax
32 addl $1,%edx
33 addl %eax,(%esi,%ebx,4)
34 cmpl $100,%edx
35 jne .L3
36 addl $1,%ebx
37 cmpl $100,%ebx
38 jne .L4
39 addl $400,-16(%ebp)
40 addl $400,%esi
41 cmpl $40000,-16(%ebp)
42 jne .L2
43 addl $4,%esp
44 popl %ebx
45 popl %esi
46 popl %edi
47 popl %ebp
48 ret
49 .size multiply,.-multiply
50 .ident "GCC: (Debian 4.3.2-1.1) 4.3.2"
51 .section .note.GNU-stack,"",@progbits
```

Ebene informatischer Sprache: ASM [8, 4]

```
1  .file "multiply.c"
2  .text
3  .p2align 4,,15
4  .globl multiply
5  .type multiply,@function
6  multiply:
7  pushl %ebp
8  movl %esp,%ebp
9  pushl %edi
10 pushl %esi
11 pushl %ebx
12 subl $4,%esp
13 movl 16(%ebp),%esi
14 movl $0,-16(%ebp)
15 .L2:
16 movl 8(%ebp),%edi
17 xorl %ebx,%ebx
18 addl -16(%ebp),%edi
19 .p2align 4,,7
20 .p2align 3
21 .L4:
22 movl 12(%ebp),%eax
23 xorl %edx,%edx
24 movl $0,(%esi,%ebx,4)
25 leal (%eax,%ebx,4),%ecx
26 .p2align 4,,7
27 .p2align 3
28 .L3:
29 movl (%ecx),%eax
30 addl $400,%ecx
31 imull (%edi,%edx,4),%eax
32 addl $1,%edx
33 addl %eax,(%esi,%ebx,4)
34 cmpl $100,%edx
35 jne .L3
36 addl $1,%ebx
37 cmpl $100,%ebx
38 jne .L4
39 addl $400,-16(%ebp)
40 addl $400,%esi
41 cmpl $40000,-16(%ebp)
42 jne .L2
43 addl $4,%esp
44 popl %ebx
45 popl %esi
46 popl %edi
47 popl %ebp
48 ret
49 .size multiply,.-multiply
50 .ident "GCC: (Debian 4.3.2-1.1) 4.3.2"
51 .section .note.GNU-stack,"",@progbits
```

■ **Kompilation** der Quelle in ein semantisch äquivalentes Programm

- Trick: Übersetzung der Quelle vor dem **Assemblieren** beenden
 - Übersetzung¹ von multiply.c mit `-DN=100: C function` \mapsto ASM/x86

¹`gcc -O -m32 -fomit-frame-pointer -fno-pic -static -S`
Schichtenstruktur

Ebene informatischer Sprache: a.out [8, 2]

```
00000000 457f 464c 0101 0001 0000 0000 0000 0000
00000020 0001 0003 0001 0000 0000 0000 0000 0000
00000040 0114 0000 0000 0000 0034 0000 0000 0028
00000060 0009 0006 0000 0000 0000 0000 0000 0000
00000100 8955 57e5 5356 ec83 8b04 1075 45c7 00f0
00000120 0000 8b00 087d db31 7d03 90f0 748d 0026
00000140 458b 310c c7d2 9e04 0000 0000 0c8d 9098
00000160 018b c181 0190 0000 af0f 9704 c283 0101
00002000 9e04 fa83 7564 83e9 01c3 fb83 7564 81d1
00002200 f045 0190 0000 c681 0190 0000 7d81 40f0
00002400 009c 7500 83ae 04c4 5e5b 5d5f 00c3 0000
00002600 4700 4343 203a 4428 6265 6169 206e 2e34
00003000 2e33 2d32 2e31 2931 3420 332e 322e 0000
00003200 732e 6d79 6174 0062 732e 7274 6174 0062
00003400 732e 7368 7274 6174 0062 742e 7865 0074
00003600 642e 7461 0061 622e 7373 2e00 6f63 6d6d
00004000 6e65 0074 6e2e 746f 2e65 4e47 2d55 7473
00004200 6361 006b 0000 0000 0000 0000 0000 0000
00004400 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
00004600 0000 0000 0000 0000 0000 0000 001b 0000
00005000 0001 0000 0006 0000 0000 0000 0040 0000
00005200 006d 0000 0000 0000 0000 0000 0010 0000
00005400 0000 0000 0021 0000 0001 0000 0003 0000
00005600 0000 0000 00b0 0000 0000 0000 0000 0000
00006000 0000 0000 0004 0000 0000 0000 0027 0000
00006200 0008 0000 0003 0000 0000 0000 00b0 0000
00006400 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0004 0000
00006600 0000 0000 002c 0000 0001 0000 0000 0000
00007000 0000 0000 00b0 0000 001f 0000 0000 0000
00007200 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0035 0000
00007400 0001 0000 0000 0000 0000 0000 00cf 0000
00007600 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0001 0000
00010000 0000 0000 0011 0000 0003 0000 0000 0000
00010200 0000 0000 00cf 0000 0045 0000 0000 0000
00010400 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0001 0000
00010600 0002 0000 0000 0000 0000 0000 027c 0000
00011000 0080 0000 0008 0000 0007 0000 0004 0000
00011200 0010 0000 0009 0000 0003 0000 0000 0000
00011400 0000 0000 02fc 0000 0015 0000 0000 0000
00011600 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0000 0000
00012000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0001 0000
00012200 0000 0000 0000 0000 0004 fff1 0000 0000
00012400 0000 0000 0000 0000 0003 0001 0000 0000
00012600 0000 0000 0000 0000 0003 0002 0000 0000
00013000 0000 0000 0000 0000 0003 0003 0000 0000
00013200 0000 0000 0000 0000 0003 0005 0000 0000
00013400 0000 0000 0000 0000 0003 0004 000c 0000
00013600 0000 0000 006d 0000 0012 0001 6d00 6c75
00014000 6974 6c70 2e79 0063 756d 746c 7069 796c
00014200 0000
```

- **Assemblieren** der kompilierten Quelle und Ausgabeaufbereitung
 - Hexadezimalcode

Ebene informatischer Sprache: a.out [8, 2]

```
00000000 457f 464c 0101 0001 0000 0000 0000 0000
00000020 0001 0003 0001 0000 0000 0000 0000 0000
00000040 0114 0000 0000 0000 0034 0000 0000 0028
00000060 0009 0006 0000 0000 0000 0000 0000 0000
00000100 8955 57e5 5356 ec83 8b04 1075 45c7 00f0
00000120 0000 8b00 087d db31 7d03 90f0 748d 0026
00000140 458b 310c c7d2 9e04 0000 0000 0c8d 9098
00000160 018b c181 0190 0000 af0f 9704 c283 0101
0000200 9e04 fa83 7564 83e9 01c3 fb83 7564 81d1
0000220 f045 0190 0000 c681 0190 0000 7d81 40f0
0000240 009c 7500 83ae 04c4 5e5b 5d5f 00c3 0000
0000260 4700 4343 203a 4428 6265 6169 206e 2e34
0000300 2e33 2d32 2e31 2931 3420 332e 322e 0000
0000320 732e 6d79 6174 0062 732e 7274 6174 0062
0000340 732e 7368 7274 6174 0062 742e 7865 0074
0000360 642e 7461 0061 622e 7373 2e00 6f63 6d6d
0000400 6e65 0074 6e2e 746f 2e65 4e47 2d55 7473
0000420 6361 006b 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000440 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000460 0000 0000 0000 0000 0000 0000 001b 0000
0000500 0001 0000 0006 0000 0000 0000 0040 0000
0000520 006d 0000 0000 0000 0000 0000 0010 0000
0000540 0000 0000 0021 0000 0001 0000 0003 0000
0000560 0000 0000 00b0 0000 0000 0000 0000 0000
0000600 0000 0000 0004 0000 0000 0000 0027 0000
0000620 0008 0000 0003 0000 0000 0000 00b0 0000
0000640 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0004 0000
0000660 0000 0000 002c 0000 0001 0000 0000 0000
0000700 0000 0000 00b0 0000 001f 0000 0000 0000
0000720 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0035 0000
0000740 0001 0000 0000 0000 0000 0000 00cf 0000
0000760 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0001 0000
0001000 0000 0000 0011 0000 0003 0000 0000 0000
0001020 0000 0000 00cf 0000 0045 0000 0000 0000
0001040 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0001 0000
0001060 0002 0000 0000 0000 0000 0000 027c 0000
0001100 0080 0000 0008 0000 0007 0000 0004 0000
0001120 0010 0000 0009 0000 0003 0000 0000 0000
0001140 0000 0000 02fc 0000 0015 0000 0000 0000
0001160 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0000 0000
0001200 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0001 0000
0001220 0000 0000 0000 0000 0004 fff1 0000 0000
0001240 0000 0000 0000 0000 0003 0001 0000 0000
0001260 0000 0000 0000 0000 0003 0002 0000 0000
0001300 0000 0000 0000 0000 0003 0003 0000 0000
0001320 0000 0000 0000 0000 0003 0005 0000 0000
0001340 0000 0000 0000 0000 0003 0004 000c 0000
0001360 0000 0000 006d 0000 0012 0001 6d00 6c75
0001400 6974 6c70 2e79 0063 756d 746c 7069 796c
0001420 0000
```

■ **Assemblieren** der kompilierten Quelle und Ausgabeaufbereitung

■ Hexadezimalcode **ausführbar** – jedoch kein ausführbares Programm!

1. `as multiply.s: ASM/x86 ↦ a.out/x86` (Binde-/Lademodul)
2. `od -x a.out ↪ hexadezimaler (-x) Speicherauszug (dump, od)`

Ebene informatischer Sprache: Binärkode

```
010101011000100111100101010111100101011001010011100000111110110000000100
100010111110010100010000110001110100010111110000000000000000000000000000
000000001000101111101101000010000011000111011011000000110111110111110000
1001000010001101011101000010011000000000010001011010001010000110000110001
1101001011000111000001001001111000000000000000000000000000000000000010001101
0000110010011000100100001000101100000001100000011100000110010000000000001
0000000000000000000000000000111110101111000001001001011110000011110000100000001
00000001000001001001111010000011111101001100100011101011110100110000011
11000011000000011000001111110110110010001110101110100011000000101000101
11110000100100000000000001000000000000000010000001110001101001000000000001
0000000000000000010000001011111011111000001000000100111000000000000000000
011101011010111010000011110001010000010001011011010111100101111101011101
11000011
```

hervorgehobene Bitfolgen repräsentieren (durch `.p2align`, vgl. S. 21) aufgefüllte Nulloperationen

- **Auflösung** des ausführbaren Hexadezimalcodes zur **Bitfolge**
 - die Befehlsverarbeitung geschieht bitweise, nicht byte- oder wortweise

Ebene informatischer Sprache: Binärkode

```
010101011000100111100101010111100101011001010011100000111110110000000100
1000101111100101000100001100011101000101111100000000000000000000000000
0000000010001011111011010000100000110001110110110000001101111011110000
1001000010001101011101000010011000000000000000000000000000000000000000
110100101100011100000100100111100000000000000000000000000000000000000010001101
0000110010011000100100001000101100000001100000011100000110010000000000001
0000000000000000000000111110101111000001001001011110000011110000100000001
00000001000001001001111010000011111101001100100011101011110100110000011
11000011000000011000001111110110110010001110101110100011000000101000101
1111000010010000000000001000000000000000000000001000000111000110100100000000001
00000000000000000000010000001011110111110000010000001001110000000000000000
011101011010111010000011110001010000010001011011010111100101111101011101
11000011
```

hervorgehobene Bitfolgen repräsentieren (durch .p2a1.ign, vgl. S. 21) aufgefüllte Nulloperationen

Die für einen Digitalrechner letztendlich benötigte Form – obwohl die CPU wortweise^a auf den Speicher zugreift, mit einer Wortbreite von 8–64 Bits, je nach Prozessortechnologie.

^aGemeint ist das **Maschinenwort**, keine plattformunabhängige Dateneinheit.

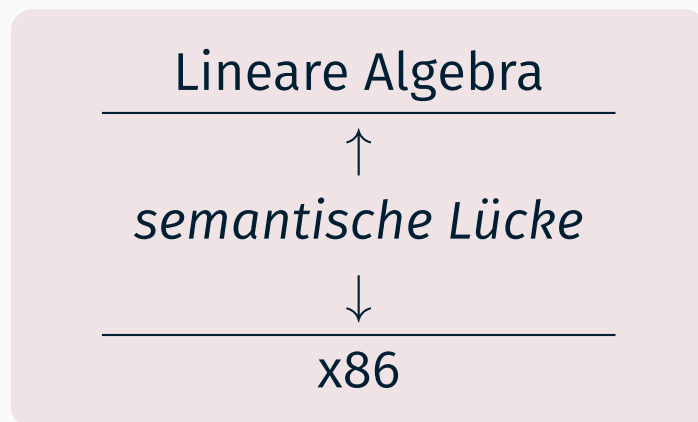
Abstraktionshierarchie von Sprachsystemen

- **Modellsprache** (Lineare Algebra) \rightsquigarrow 1 Produktsummenformel
- **Programmiersprache** (C) \rightsquigarrow 5 Komplexschritte
- **Assemblersprache** (ASM/x86) \rightsquigarrow $35+n$ Elementarschritte
- **Maschinensprache** (Linux/x86) \rightsquigarrow 109 Bytes Programmtext
(x86) \rightsquigarrow 872 Bits

Abstraktionshierarchie von Sprachsystemen

- **Modellsprache** (Lineare Algebra) \leadsto 1 Produktsummenformel
- **Programmiersprache** (C) \leadsto 5 Komplexschritte
- **Assemblersprache** (ASM/x86) \leadsto $35+n$ Elementarschritte
- **Maschinensprache** (Linux/x86) \leadsto 109 Bytes Programmtext
(x86) \leadsto 872 Bits

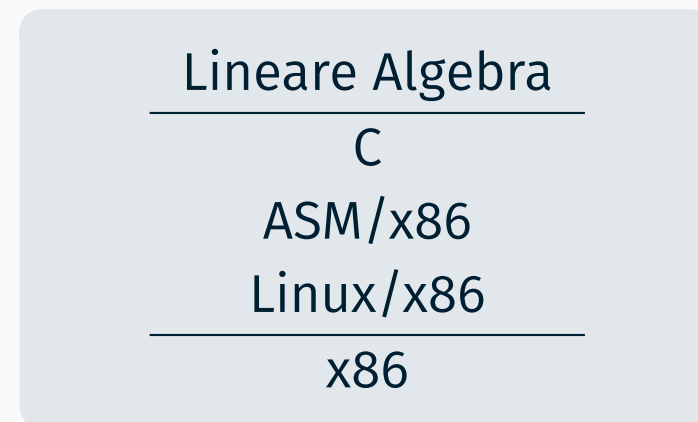
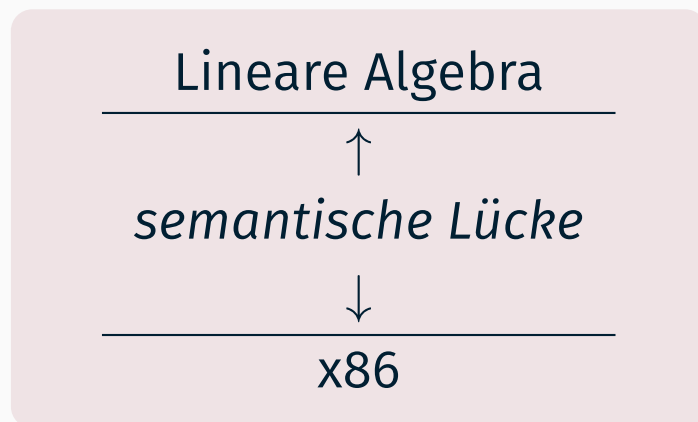
↪ eine einzelne komplexe und überwältigende Aufgabe



Abstraktionshierarchie von Sprachsystemen

- **Modellsprache** (Lineare Algebra) \leadsto 1 Produktsummenformel
- **Programmiersprache** (C) \leadsto 5 Komplexschritte
- **Assemblersprache** (ASM/x86) \leadsto $35+n$ Elementarschritte
- **Maschinensprache** (Linux/x86) \leadsto 109 Bytes Programmtext
(x86) \leadsto 872 Bits

↪ eine einzelne komplexe und überwältigende Aufgabe in mehrere kleine und handhabbare unterteilen



Einführung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Fallstudie

Mehrebenenmaschinen

Maschinenhierarchie

Maschinen und Prozessoren

Entvirtualisierung

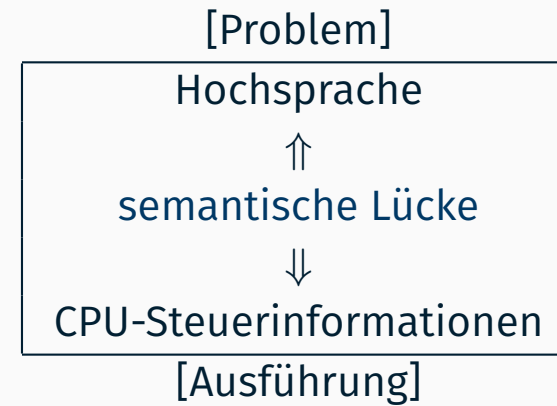
Ausnahmesituation

Zusammenfassung

Mehrebenenmaschinen

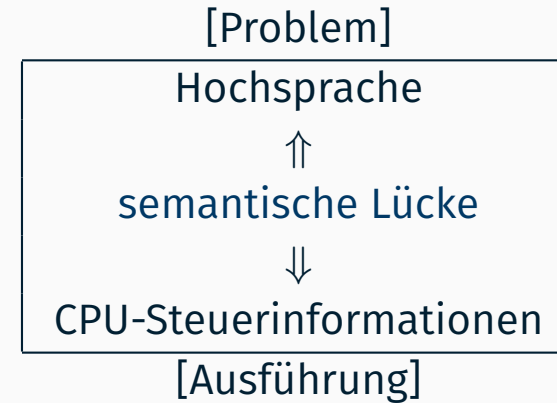
Maschinenhierarchie

Aufgabenstellung \mapsto Programmlösung

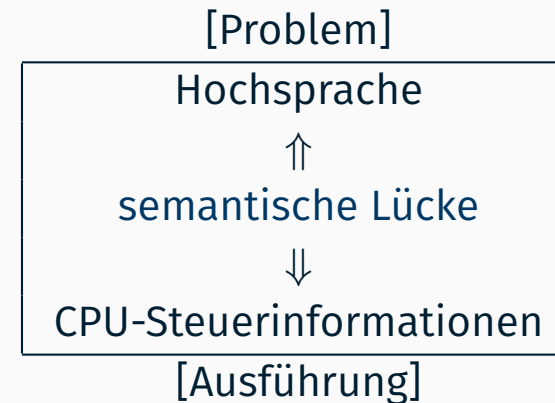


Aufgabenstellung \mapsto Programmlösung

- das Ausmaß der semantischen Lücke gestaltet sich fallabhängig:
 - bei gleich bleibendem Problem mit der Plattform (dem System)
 - bei gleich bleibender Plattform mit dem Problem (der Anwendung)

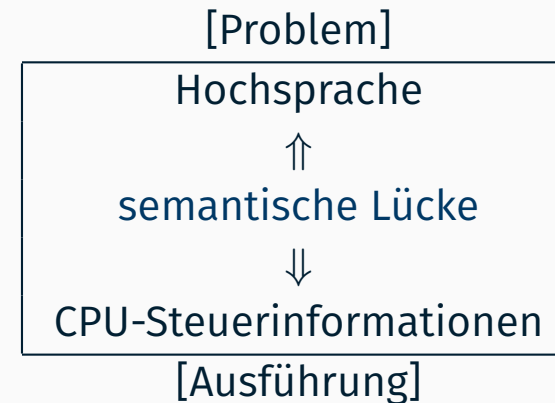


Aufgabenstellung \mapsto Programmlösung



- der Lückenschluss ist ganzheitlich zu sehen und auch anzugehen
 - Schicht für Schicht die innere (logische) Struktur des Systems herleiten
 - das System, das die Lücke schließen soll, als Ganzes als „Bild“ erfassen
 - hinsichtlich benötigter funktionalen und nicht-funktionalen Eigenschaften

Aufgabenstellung \mapsto Programmlösung



- Kunst der kleinen Schritte: semantische Lücke schrittweise schließen
 - durch hierarchisch angeordnete virtuelle Maschinen Programmlösungen auf die reale Maschine herunterbrechen [12]
 - Prinzip *divide et impera* („teile und herrsche“)
 - einen „Gegner“ in leichter besiegbare „Untergruppen“ aufspalten

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S. 3]

- **Interpretation** und **Übersetzung** (Kompilation, Assemblieren)

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S.3]

■ Interpretation und Übersetzung (Kompilation, Assemblieren):

Ebene

n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinensprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
-----	---	---

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S.3]

■ Interpretation und Übersetzung (Kompilation, Assemblieren):

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinensprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Pro- gramme tieferer Maschinen übersetzt
⋮	⋮	⋮

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S.3]

■ Interpretation und Übersetzung (Kompilation, Assemblieren):

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinsprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
\vdots	\vdots	\vdots
2	virtuelle Maschine M_2 mit Maschinsprache S_2	Programme in S_2 werden von einem auf M_1 bzw. M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_1 bzw. S_0 übersetzt

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S. 3]

■ Interpretation und Übersetzung (Kompilation, Assemblieren):

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinsprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
\vdots	\vdots	\vdots
2	virtuelle Maschine M_2 mit Maschinsprache S_2	Programme in S_2 werden von einem auf M_1 bzw. M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_1 bzw. S_0 übersetzt
1	virtuelle Maschine M_1 mit Maschinsprache S_1	Programme in S_1 werden von einem auf M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_0 übersetzt

Hierarchie virtueller Maschinen [13, S.3]

■ Interpretation und Übersetzung (Kompilation, Assemblieren):

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinsprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
\vdots	\vdots	\vdots
2	virtuelle Maschine M_2 mit Maschinsprache S_2	Programme in S_2 werden von einem auf M_1 bzw. M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_1 bzw. S_0 übersetzt
1	virtuelle Maschine M_1 mit Maschinsprache S_1	Programme in S_1 werden von einem auf M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_0 übersetzt
0	reale Maschine M_0 mit Maschinsprache S_0	Programme in S_0 werden direkt von der Hardware ausgeführt

- **Interpretation** und **Übersetzung** (Kompilation, Assemblieren)

- Techniken, die einander unterstützend — teils sogar „symbiotisch“ — Verwendung finden, um Programme zur Ausführung zu bringen

Abstrakter Prozessor

- jede einzelne Ebene (d.h., Schicht) in der Hierarchie wird durch einen spezifischen Prozessor implementiert

- jede einzelne Ebene (d.h., Schicht) in der Hierarchie wird durch einen spezifischen Prozessor implementiert:

Kom|pi|la|tor *lat.* (Zusammenträger)

- ein **Softwareprozessor**, transformiert in einer *Quellsprache* vorliegende Programme in eine semantisch äquivalente Form einer *Zielsprache*
 - {Ada, C, C++, Eiffel, Modula, Fortran, Pascal, ...} \mapsto Assembler
 - aber ebenso: C++ \mapsto C \mapsto Assembler

- jede einzelne Ebene (d.h., Schicht) in der Hierarchie wird durch einen spezifischen Prozessor implementiert:

In|ter|pret *lat.* (Ausleger, Erklärer, Deuter)

- ein **Hard-, Firm- oder Softwareprozessor**, der die Programme direkt ausführt \leadsto ausführbares Programm (*executable*)
 - z.B. Basic, Perl, C, `sh(1)`, x86

- jede einzelne Ebene (d.h., Schicht) in der Hierarchie wird durch einen spezifischen Prozessor implementiert:

In|ter|pret *lat.* (Ausleger, Erklärer, Deuter)

- ein **Hard-, Firm- oder Softwareprozessor**, der die Programme direkt ausführt \leadsto ausführbares Programm (*executable*)
 - z.B. Basic, Perl, C, `sh(1)`, x86
- ggf. **Vorübersetzung** durch einen Kompilierer, um die Programme in eine für die Interpretation günstigere Repräsentation zu bringen
 - z.B. Pascal P-Code, Java Bytecode, x86-Befehle

- jede einzelne Ebene (d.h., Schicht) in der Hierarchie wird durch einen spezifischen Prozessor implementiert:

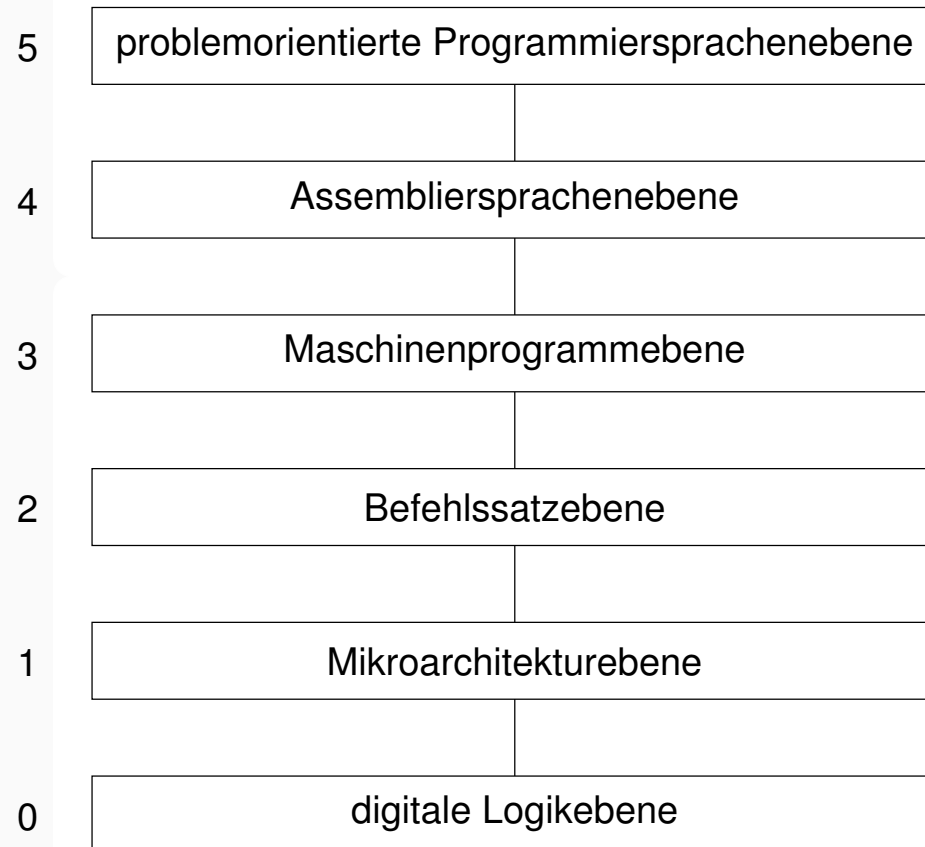
Kom|pi|la|tor *lat.* (Zusammenträger)

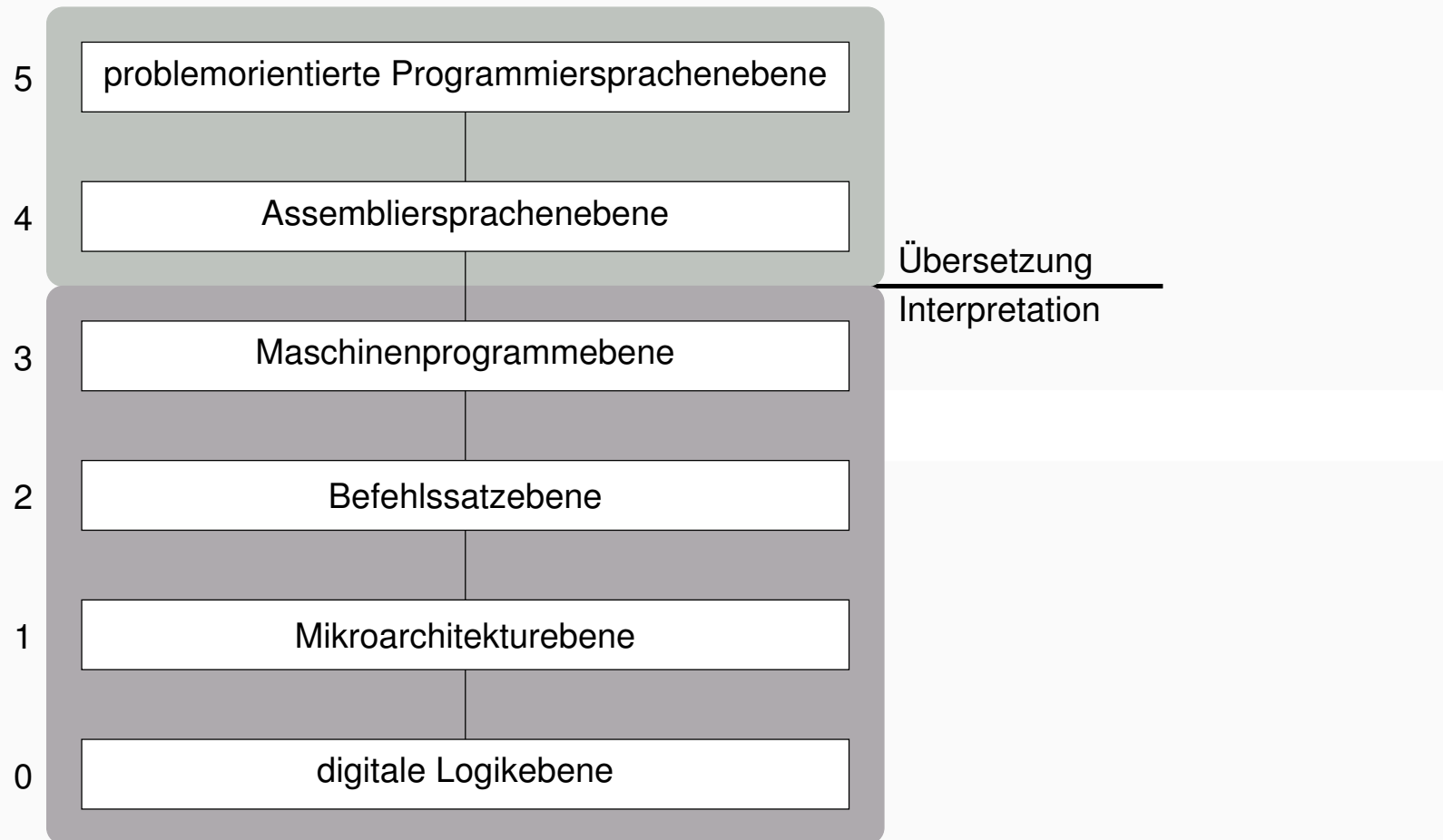
In|ter|pret *lat.* (Ausleger, Erklärer, Deuter)

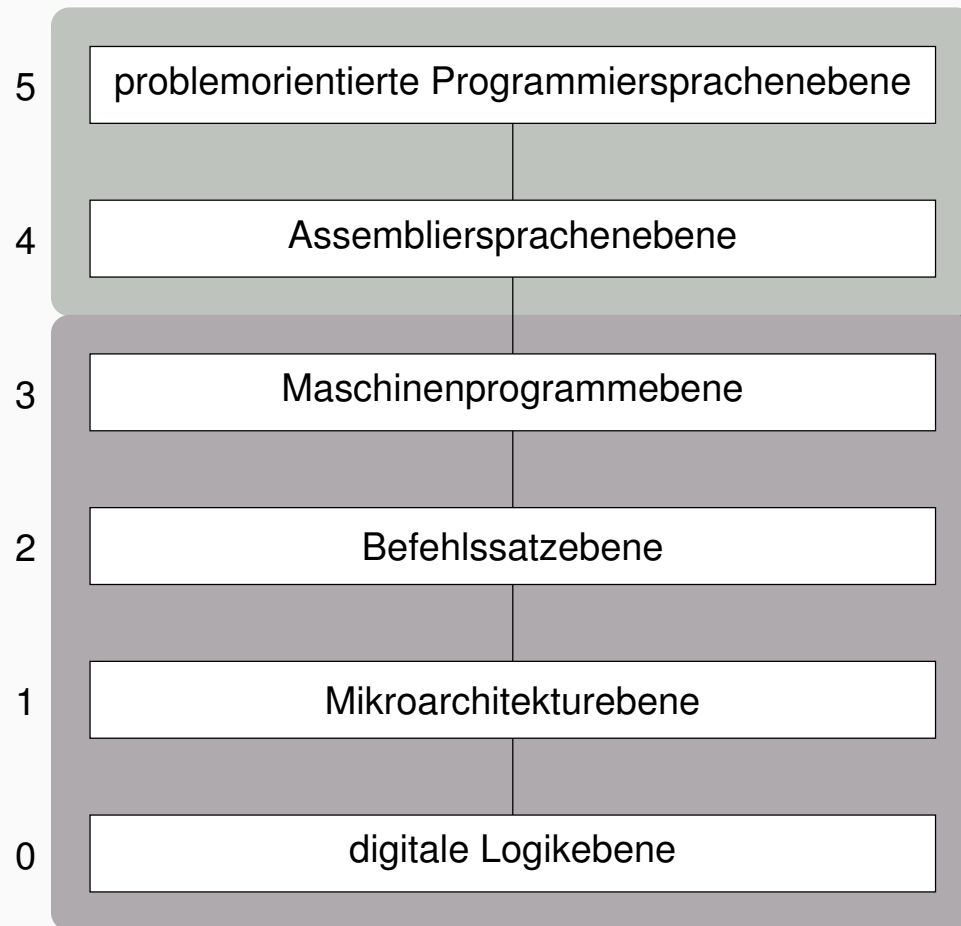
- also abstrakte oder reale Prozessoren, die vor beziehungsweise zur Ausführungszeit des Programms wirken, das sie verarbeiten

Mehrebenenmaschinen

Maschinen und Prozessoren

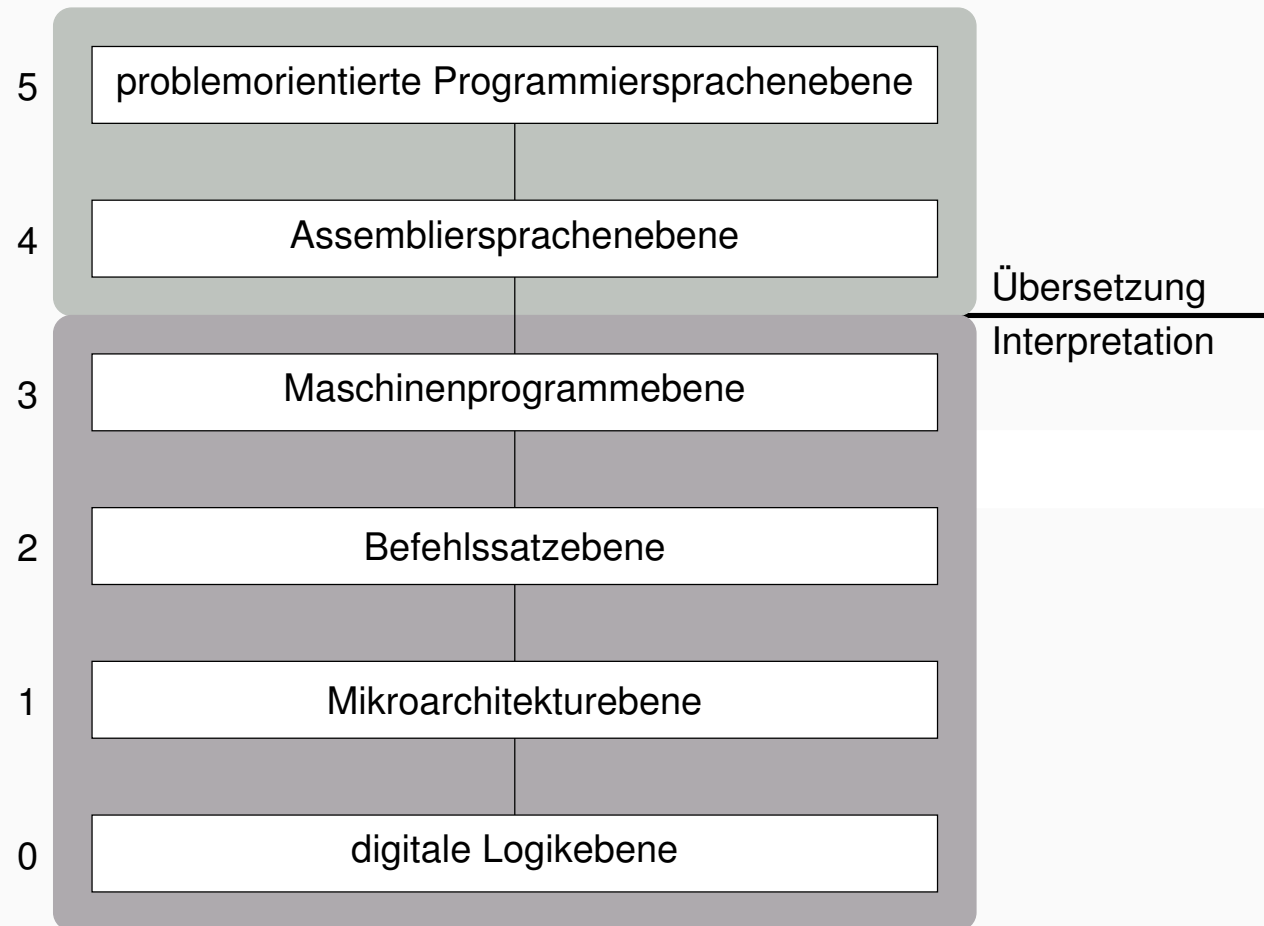




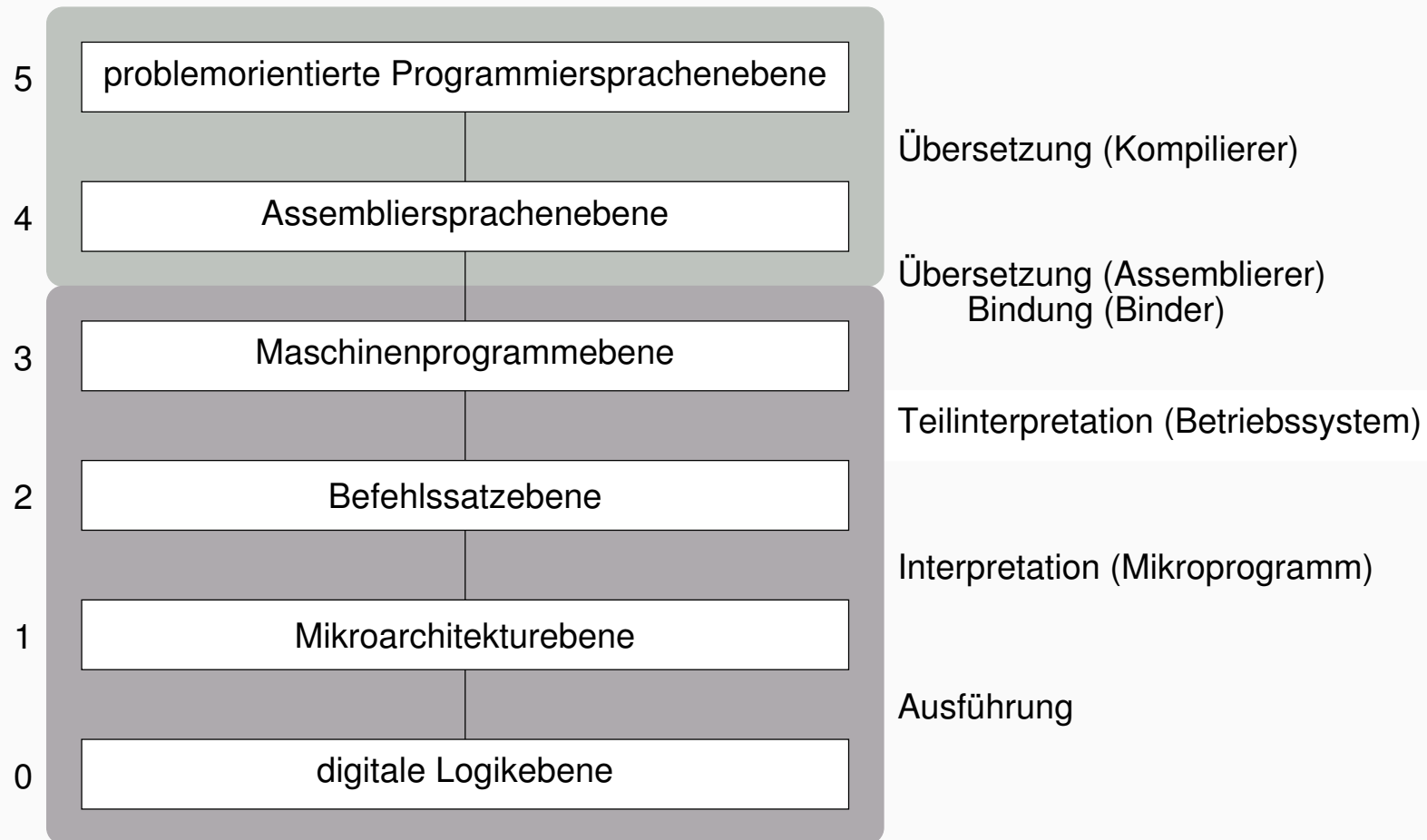


Demarkationslinie

- Methode der Abbildung
 - ≥ 4 Übersetzung vs.
 - ≤ 3 Interpretation
- Art der Programmierung
 - ≥ 4 Anwendung vs.
 - ≤ 3 System
- Natur der Sprache
 - ≥ 4 symbolisch vs.
 - ≤ 3 numerisch

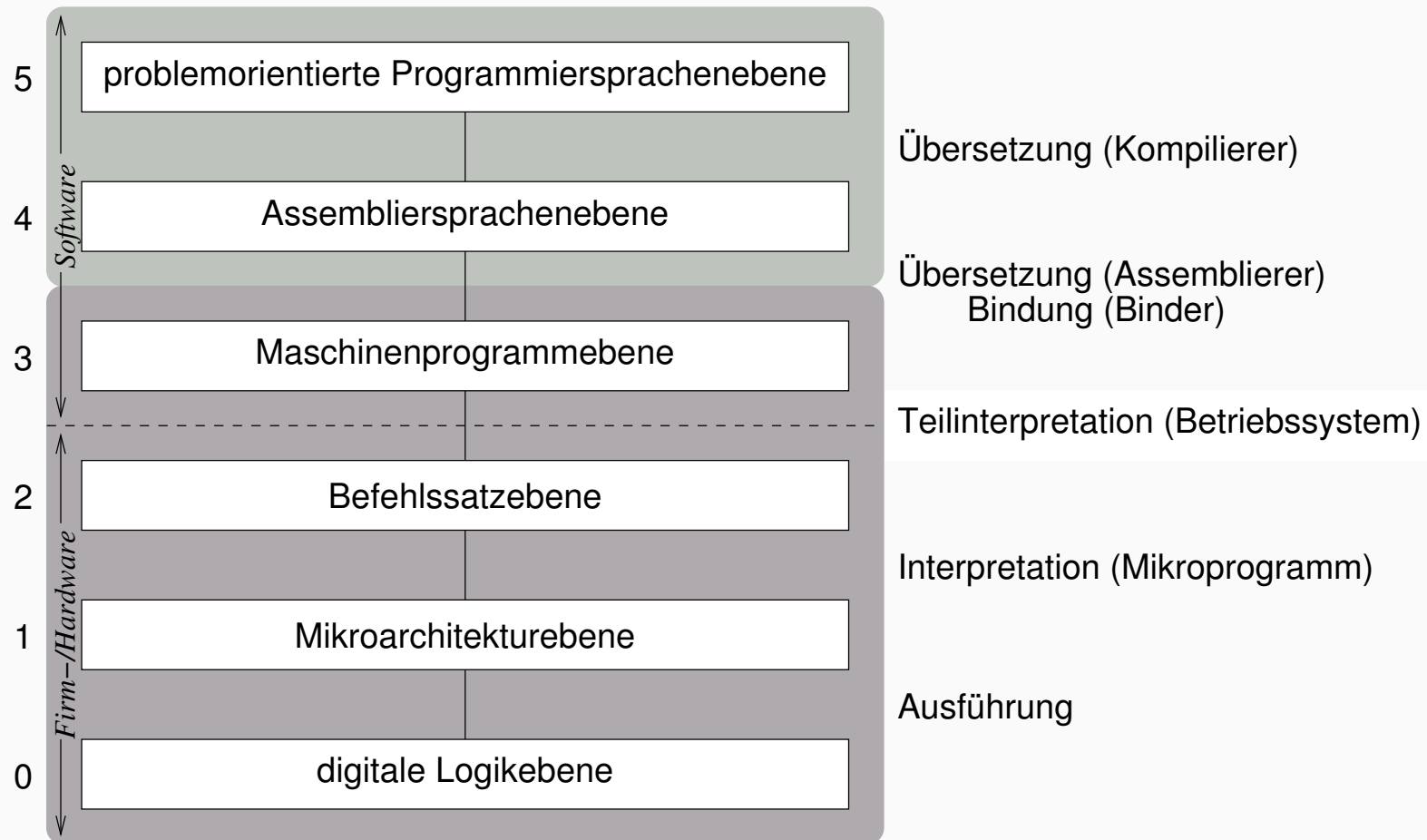


- Schichten der Ebene_[4,5] sind nicht wirklich existent sondern
 - werden durch Übersetzung aufgelöst und auf tiefere Ebenen abgebildet
 - so dass am Ende nur ein Maschinenprogramm (Ebene₃) übrig bleibt



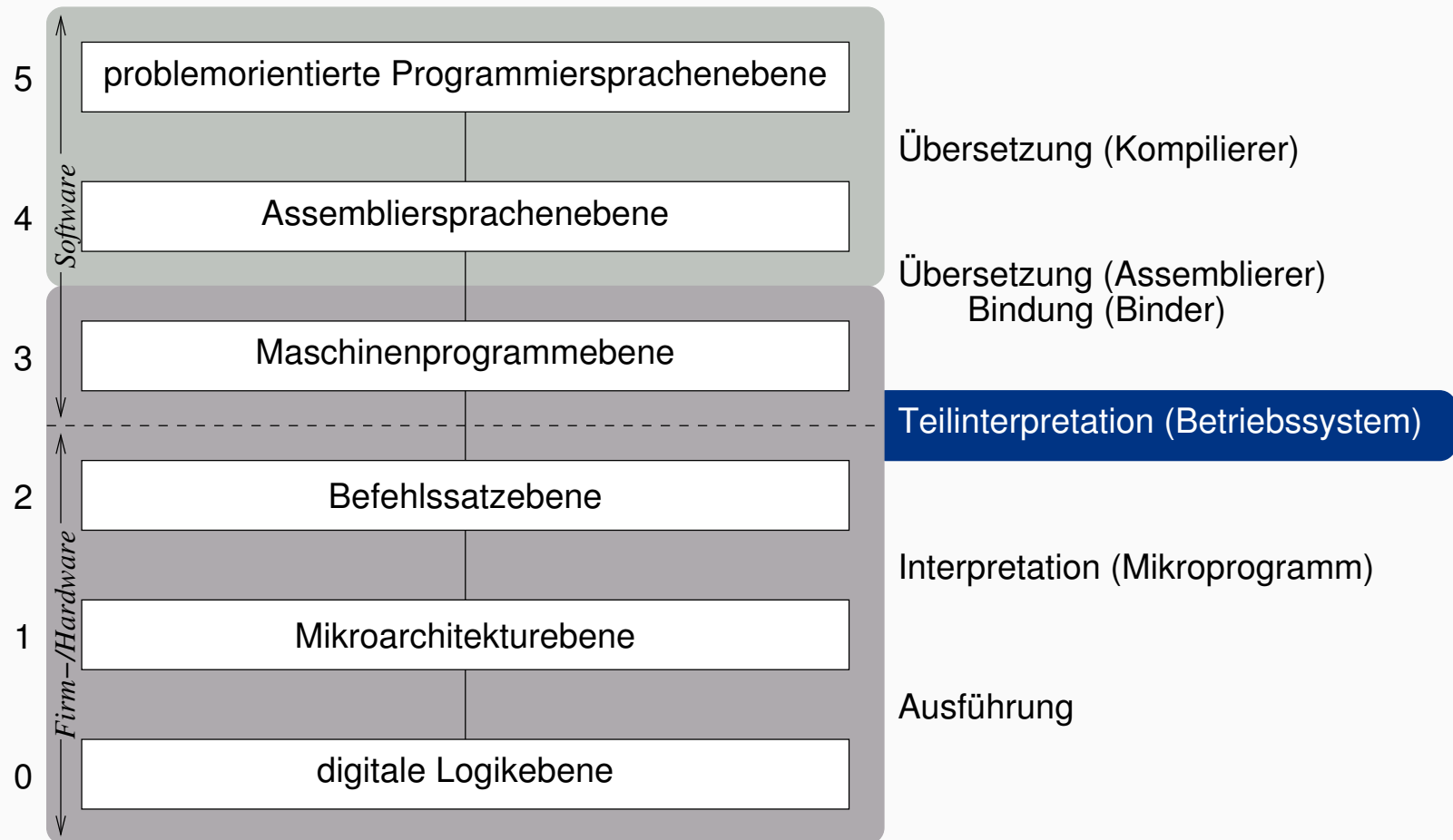
Schichtenfolge in Rechensystemen II

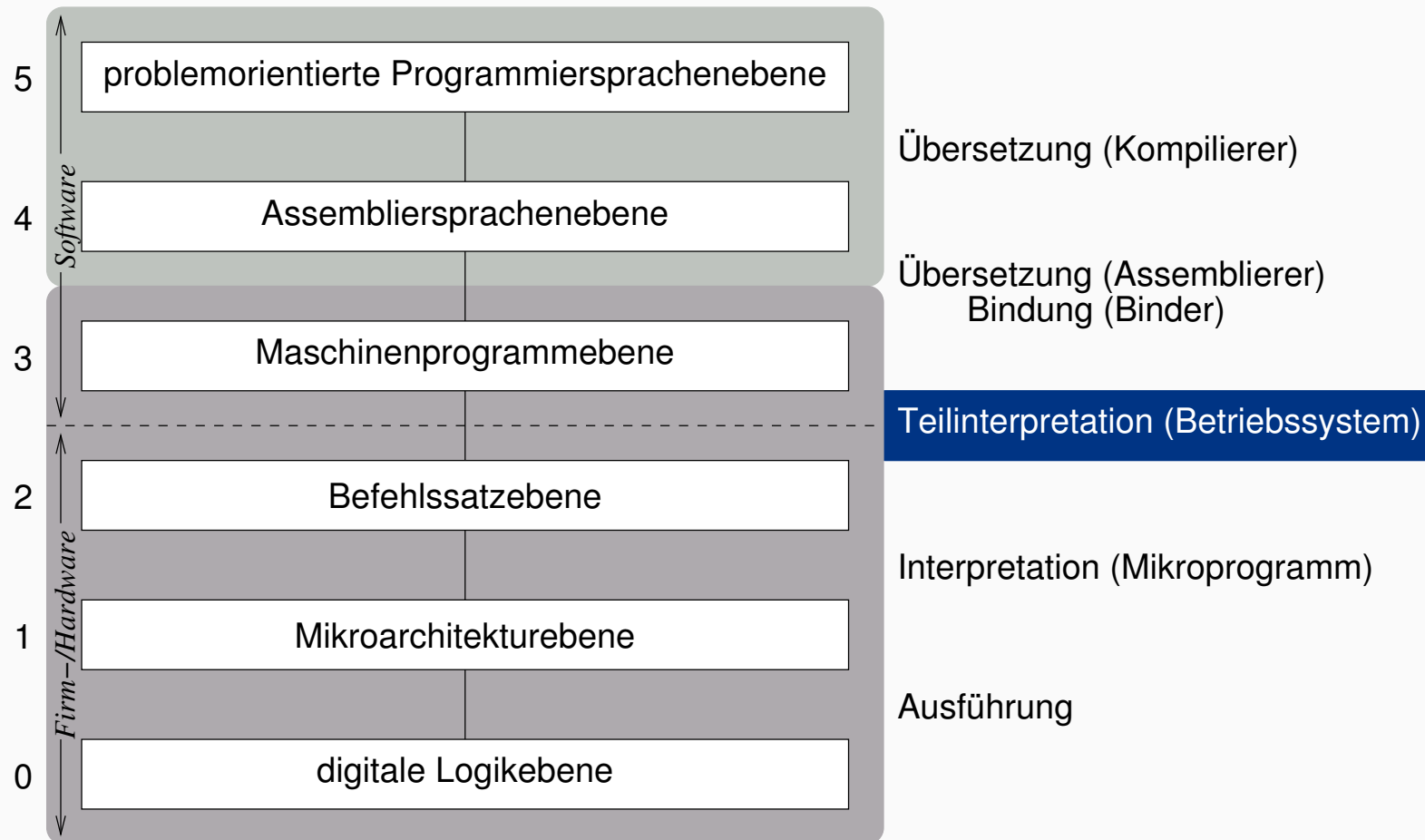
in Anlehnung an [12]



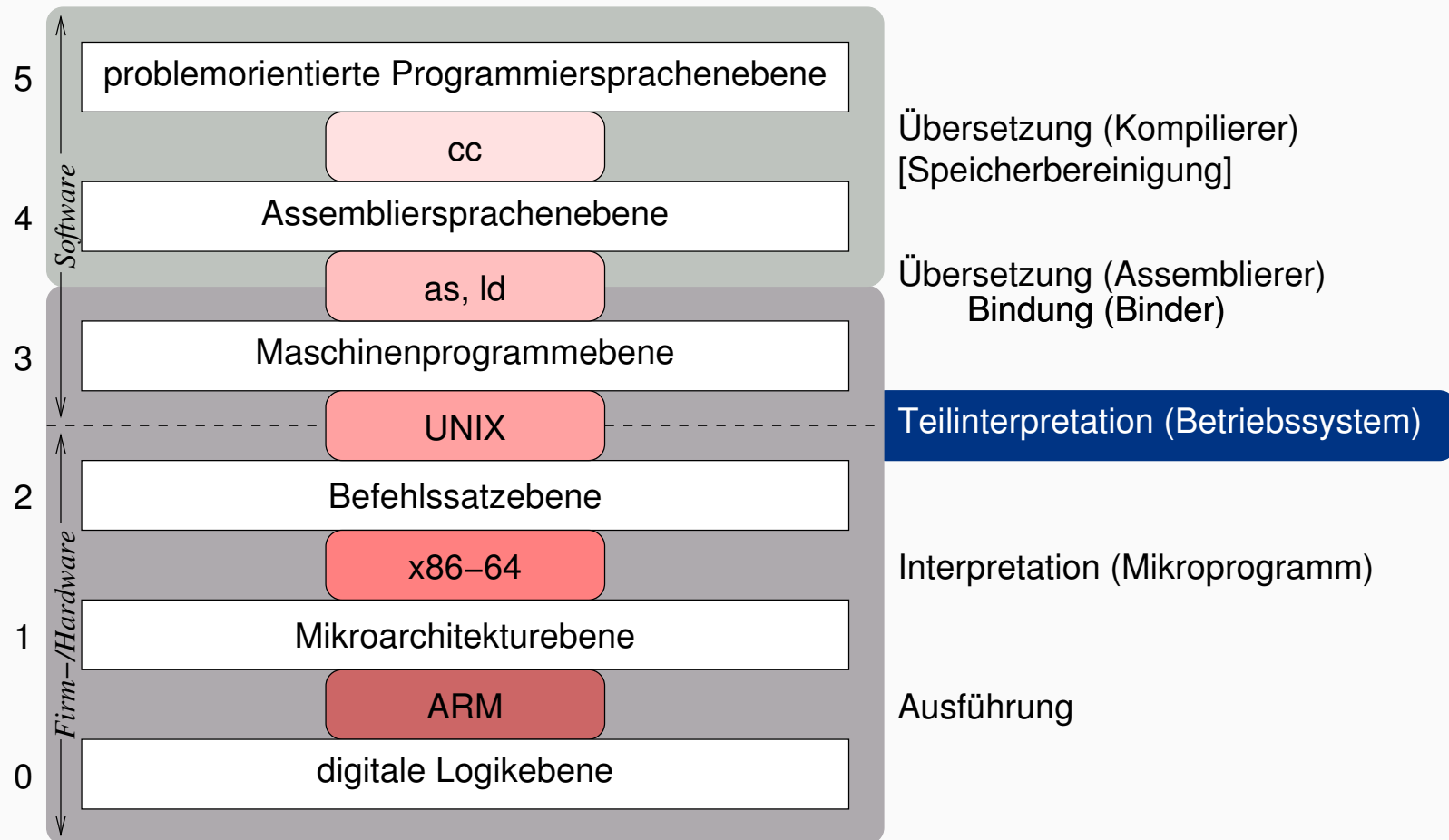
Schichtenfolge in Rechensystemen II

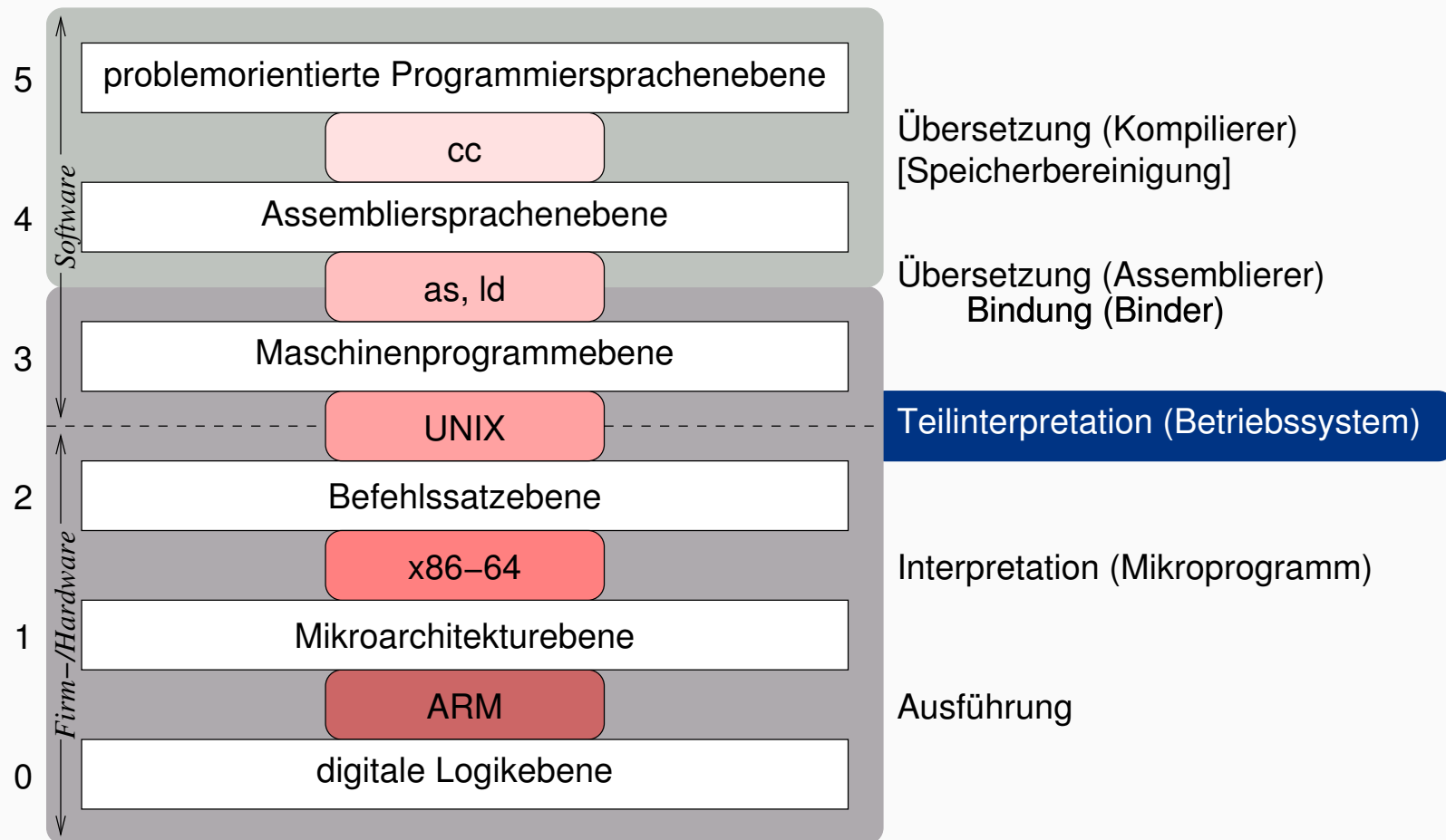
in Anlehnung an [12]





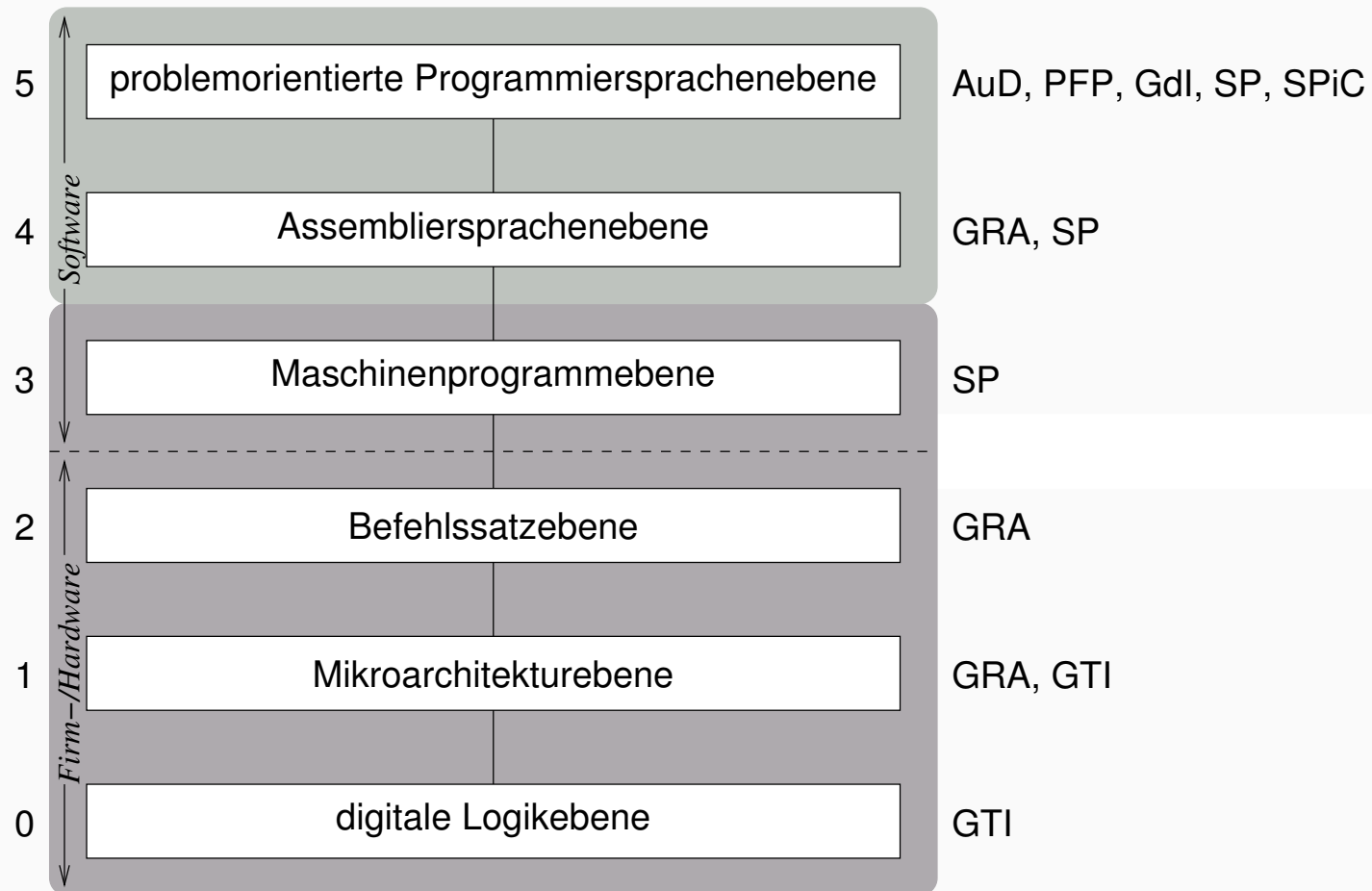
- Schichten der Ebene_[0,2] liegen normalerweise nicht in SW vor
 - sie können aber in Software simuliert/emuliert oder virtualisiert werden
 - dadurch lassen sich Rechensysteme grundsätzlich **rekursiv** organisieren



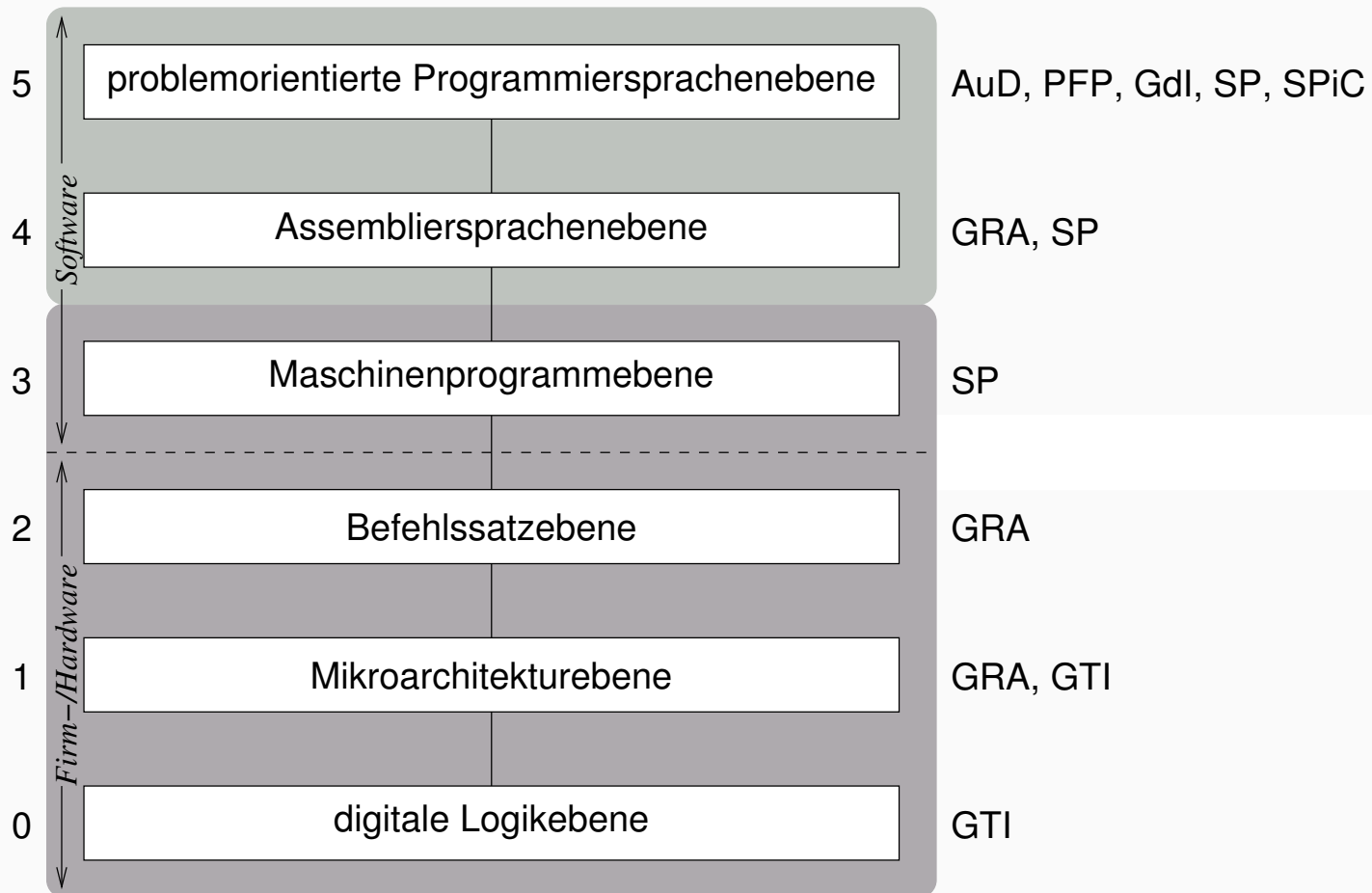


- RISC auf Ebene₁ und gegebenenfalls (hier) CISC auf Ebene₂
 - nach außen „complex“, innen aber „reduced instruction set computer“
 - Intel Core oder Haswell ↔ AMD Bulldozer oder Zen (ARM)

Schichtenfolge eingebettet im Informatikstudiengang



Schichtenfolge eingebettet im Informatikstudiengang



- die Schicht auf Ebene₄ ist auch hier eher nur logisch existent 😊
 - Programmierung in Assemblersprache hat (leider) an Bedeutung verloren
 - Prinzipien werden in GRA vermittelt [5], in SP nur bei Bedarf behandelt

Mehrebenenmaschinen

Entvirtualisierung

- Schichten der Ebene_[3,5] repräsentieren **virtuelle Maschinen**, die auf die eine **reale Maschine** (Ebene_[0,2]) abzubilden sind
 - dabei werden diese Schichten „entvirtualisiert“, aufgelöst und zu einem **Maschinenprogramm** „verschmolzen“
 - dieser Vorgang hängt stark ab von der Art einer virtuellen Maschine²

²vgl. insb. [10]: die Folien sind Teil des ergänzenden Materials zu SP.

■ Übersetzung

- aller Befehle des Programms, das der Ebene_{*i*} zugeordnet ist
- in eine semantisch äquivalente Folge von Befehlen der Ebene_{*j*}, mit $j \leq i$
- dadurch **Generierung** eines Programms, das der Ebene_{*j*} zugeordnet ist

■ Interpretation

- total** ■ aller Befehle des Programms, das der Ebene_{*i*} zugeordnet ist
- partiell** ■ nur der Befehle des Programms, die der Ebene_{*i*} zugeordnet sind
- wobei das Programm der Ebene_{*k*}, $k \geq i$, zugeordnet sein kann
- durch **Ausführung** eines Programms der Ebene_{*j*}, mit $j \leq i$

Abbildung durch Übersetzung

Ebene₅ \mapsto Ebene₄

- Ebene₅-Befehle „1:N“, $N \geq 1$, in Ebene₄-Befehle übersetzen
 - einen Hochsprachenbefehl als mögliche Sequenz von Befehlen einer Assemblersprache implementieren
 - eine **semantisch äquivalente Befehlsfolge** generieren
- im Zuge der Transformation ggf. Optimierungsstufen durchlaufen

Ebene₄ \mapsto Ebene₃

- Ebene₄-Befehle „1:1“ in Ebene₃-Befehle übersetzen
 - ein **Quellmodul** in ein **Objektmodul** umwandeln
 - mit **Bibliotheken** zum Maschinenprogramm zusammenbinden
 - ein **Lademodul** erzeugen

Abbildung durch Übersetzung

Ebene₄ \mapsto Ebene₃

- Ebene₄-Befehle „1:1“ in Ebene₃-Befehle übersetzen
- dabei den symbolischen Maschinenkode (d.h., die Mnemone) auflösen
 - in binären Maschinenkode umwandeln
 - ADD EAX (Mnemon) \mapsto 05₁₆ (Hexadezimalkode) \mapsto 00000101₂ (Binärkode)
 - hier: Beispiel für den Befehlssatz x86-kompatibler Prozessoren

Abbildung durch Übersetzung

Ebene₅ \mapsto Ebene₄ (Kompilation)

Ebene₄ \mapsto Ebene₃ (Assemblieren)

Abbildung durch Interpretation

Ebene₃ \mapsto Ebene₂

- Ebene₃-Befehle typ- und zustandsabhängig verarbeiten:
 - i als Folgen von Ebene₂-Befehlen ausführen
 - **Systemaufrufe** annehmen und befolgen, sensitive Ebene₂-Befehle emulieren
 - synchrone/asynchrone **Unterbrechungen** behandeln
 - ii „1:1“ auf Ebene₂-Befehle abbilden (nach unten „durchreichen“)

Abbildung durch Interpretation

Ebene₃ \mapsto Ebene₂

- Ebene₃-Befehle typ- und zustandsabhängig verarbeiten:
 - i als Folgen von Ebene₂-Befehlen ausführen
 - **Systemaufrufe** annehmen und befolgen, sensitive Ebene₂-Befehle emulieren
- ein Ebene₃-Befehl aktiviert im Fall von i ein Ebene₂-Programm
 - verursacht durch eine **Ausnahmesituation**, die durch Ebene₂ erkannt und zur Behandlung an ein Programm der Ebene₂ „hochgereicht“ wird
 - Ebene₂ stellt eine Falle (*trap*), bedient von einem Ebene₂-Programm

Abbildung durch Interpretation

$\text{Ebene}_2 \mapsto \text{Ebene}_1$

- Ebene₂-Befehle als Folgen von Ebene₁-Aktionen ausführen
 - **Abruf- und Ausführungszyklus** (*fetch-execute-cycle*) der CPU
- ein Ebene₂-Befehl löst Ebene₁-Steueranweisungen aus

Abbildung durch Interpretation

Ebene₃ \mapsto Ebene₂ (*partielle* Interpretation, Teilinterpretation)

Ebene₂ \mapsto Ebene₁ (Interpretation)

Zeitpunkte der Abbildungsvorgänge

Bezugspunkt ist das jeweils zu „prozessierende“ Programm:

- **vor Laufzeit** (Ebene₅ \mapsto Ebene₃) \rightsquigarrow **statisch**
 - Vorverarbeitung (*preprocessing*)
 - Vorübersetzung (*precompilation*)
 - Übersetzung: Kompilation, Assemblieren
 - Binden (*static linking*)

Zeitpunkte der Abbildungsvorgänge

Bezugspunkt ist das jeweils zu „prozessierende“ Programm:

- **zur Laufzeit** (Ebene₅ \mapsto Ebene₁) \rightsquigarrow **dynamisch**
 - bedarfsorientierte Übersetzung (*just in time compilation*)
 - Binden (*dynamic linking*)
 - bindendes Laden (*linking loading, dynamic loading*)
 - Teilinterpretation
 - Interpretation

Zeitpunkte der Abbildungsvorgänge

■ **vor Laufzeit** (Ebene₅ \mapsto Ebene₃) \rightsquigarrow **statisch**

■ **zur Laufzeit** (Ebene₅ \mapsto Ebene₁) \rightsquigarrow **dynamisch**

Betriebssysteme entvirtualisieren zur Laufzeit

\hookrightarrow dynamisches Binden, bindendes Laden, Teilinterpretation

Mehrebenenmaschinen

Ausnahmesituation

Abweichung vom normalen Programmablauf

Abweichung vom normalen Programmablauf

- **Ausnahme** (*exception*), Sonderfall, der die **Unterbrechung** oder den **Abbruch** der Ausführung des Maschinenprogramms bedeutet

Abweichung vom normalen Programmablauf

- **Ausnahme** (*exception*), Sonderfall, der die **Unterbrechung** oder den **Abbruch** der Ausführung des Maschinenprogramms bedeutet
 - Feststellung einer **Ausnahmesituation** beim Abruf-/Ausführungszyklus
 - ungültiger Maschinenbefehl oder Systemaufruf
 - Schutz-/Zugriffsverletzung, Seitenfehler, Unterbrechungsanforderung

Abweichung vom normalen Programmablauf

- **Ausnahme** (*exception*), Sonderfall, der die **Unterbrechung** oder den **Abbruch** der Ausführung des Maschinenprogramms bedeutet

- zieht die Reaktion in Form einer **Ausnahmebehandlung** nach sich
 - realisiert durch ein spezielles Programm, einem Unterprogramm ähnlich
 - das durch erheben (*raise*) einer Ausnahme implizit aufgerufen wird

Abweichung vom normalen Programmablauf

- **Ausnahme** (*exception*), Sonderfall, der die **Unterbrechung** oder den **Abbruch** der Ausführung des Maschinenprogramms bedeutet

- die Behandlung eines solchen Sonderfalls verläuft je nach Art und Schwere der Ausnahme nach verschiedenen Modellen:

Wiederaufnahme

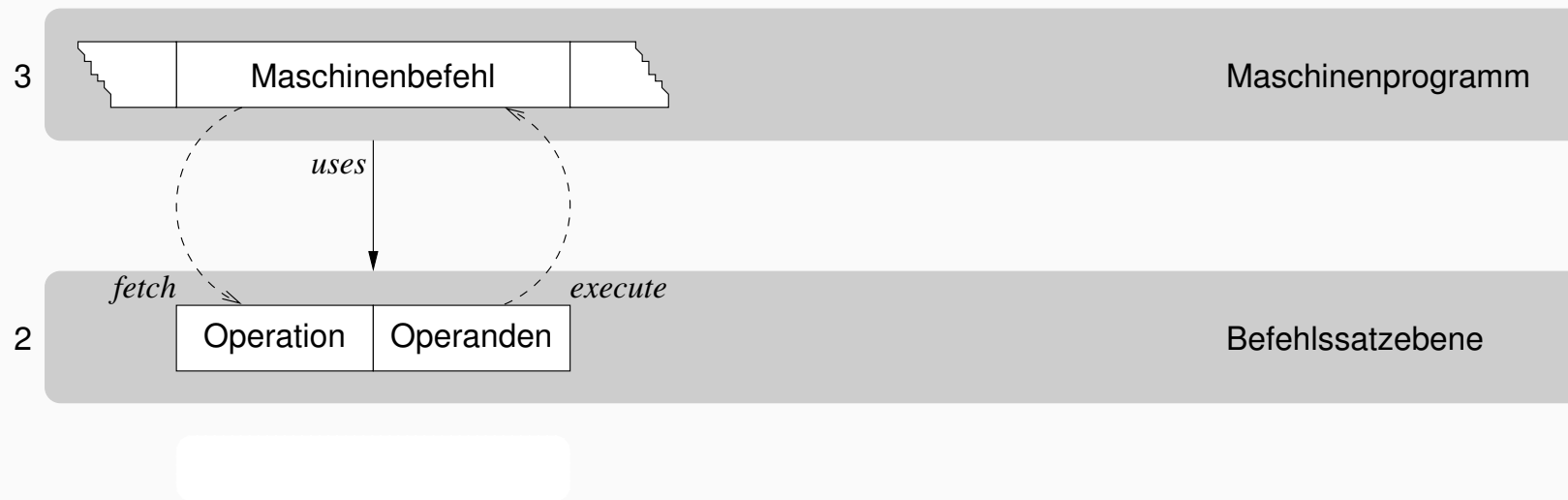
- Ausführungsfortsetzung nach erfolgter Behandlung

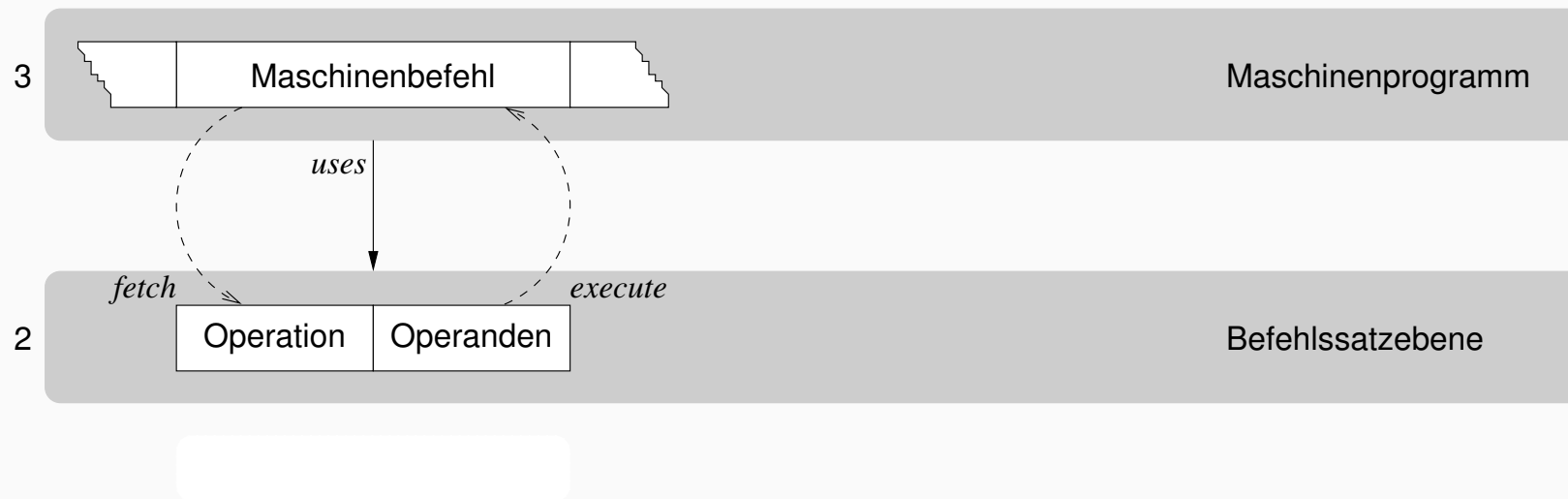
↪ Seitenfehler, Unterbrechungsanforderung

Termination

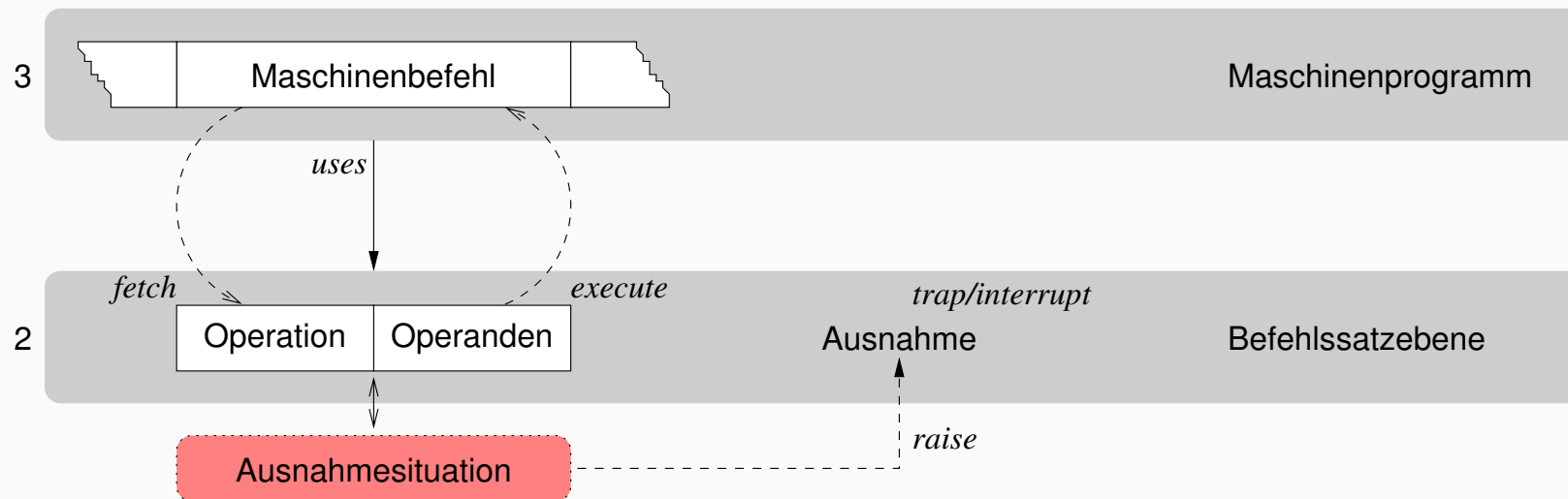
- Ausführungsabbruch, schwerwiegender Fehler

↪ ungültiger Befehl, Schutz-/Zugriffsverletzung

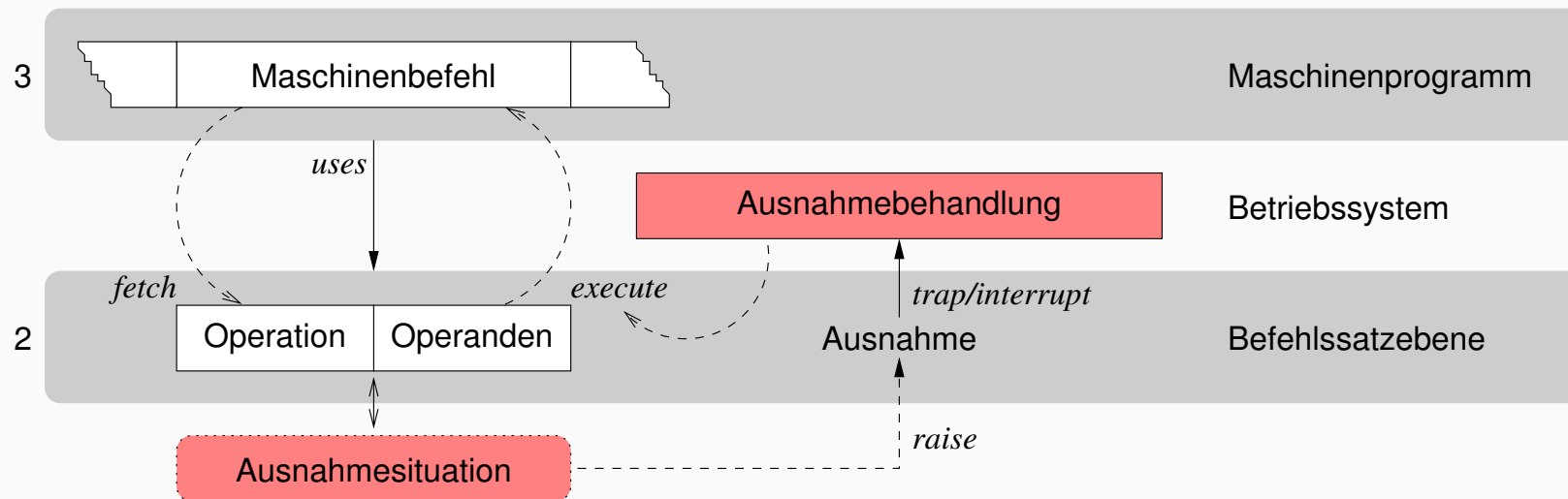




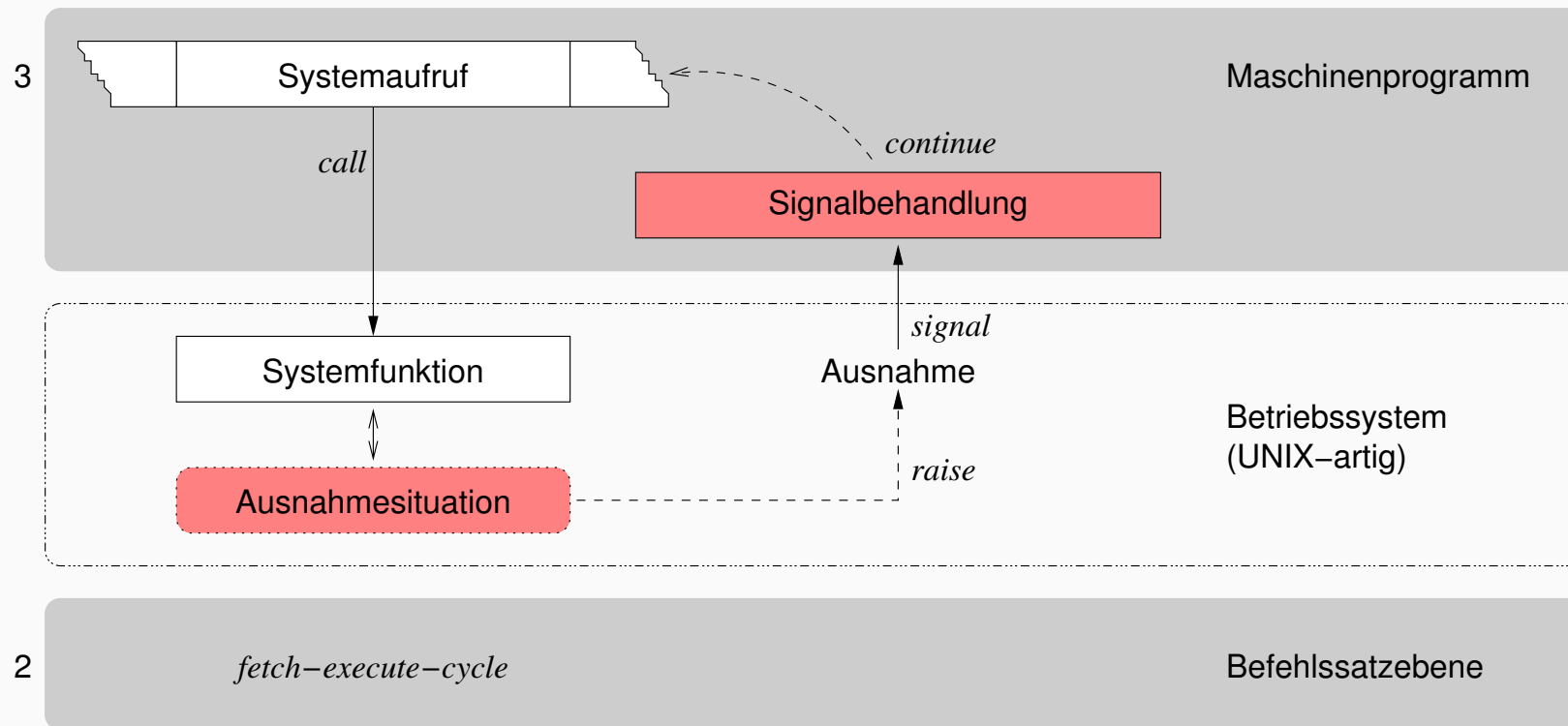
- im Abruf- und Ausführungszyklus interpretiert die CPU den nächsten Maschinenbefehl, führt so das Programm weiter aus
 - ein solcher Befehl hat einen Operations- und ggf. Operandenteil

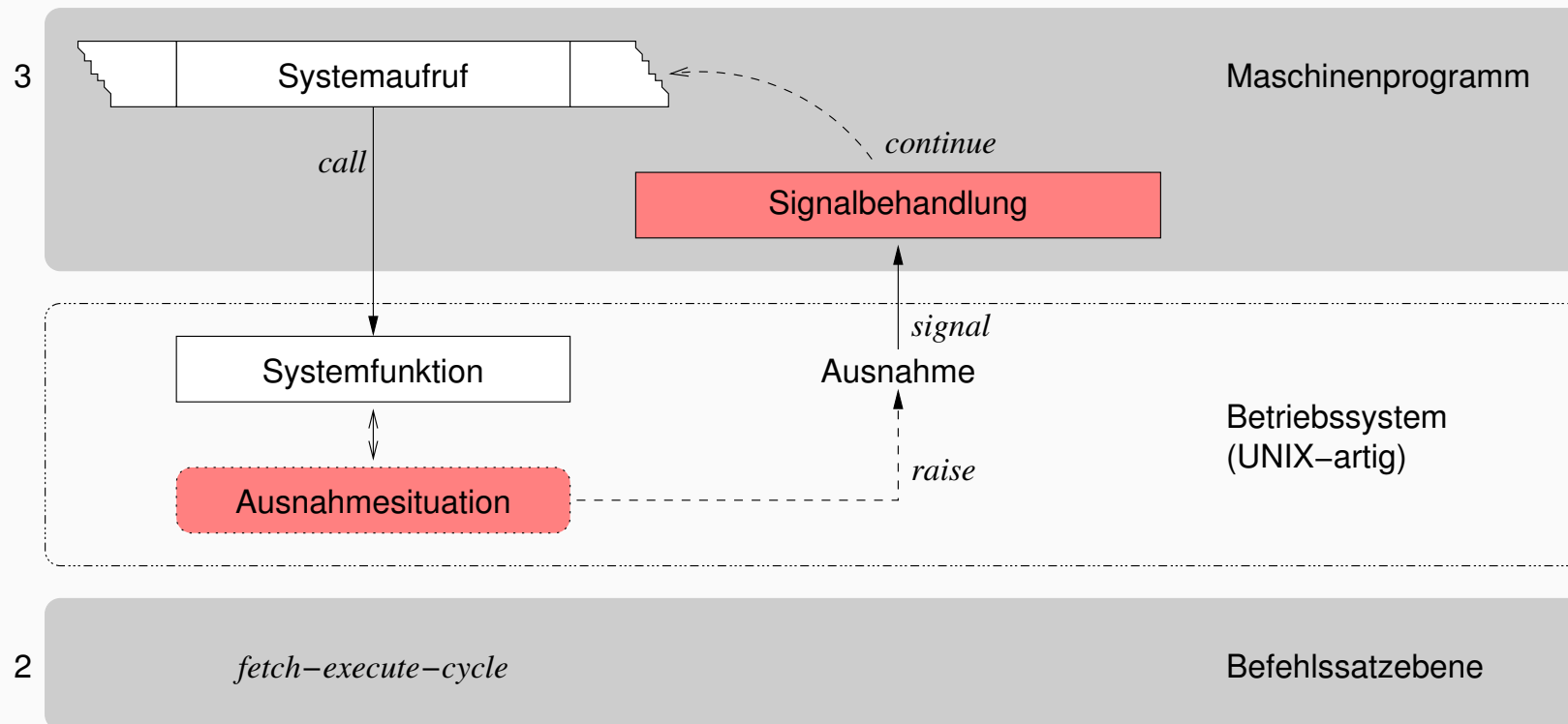


- im Abruf- und Ausführungszyklus interpretiert die CPU den nächsten Maschinenbefehl, führt so das Programm weiter aus
- bei der Interpretation dieses Befehls tritt eine Ausnahmesituation auf, die CPU erhebt (*raise*) eine Ausnahme
 - die Operation wird abgefangen (*trap*) bzw. unterbrochen (*interrupt*)

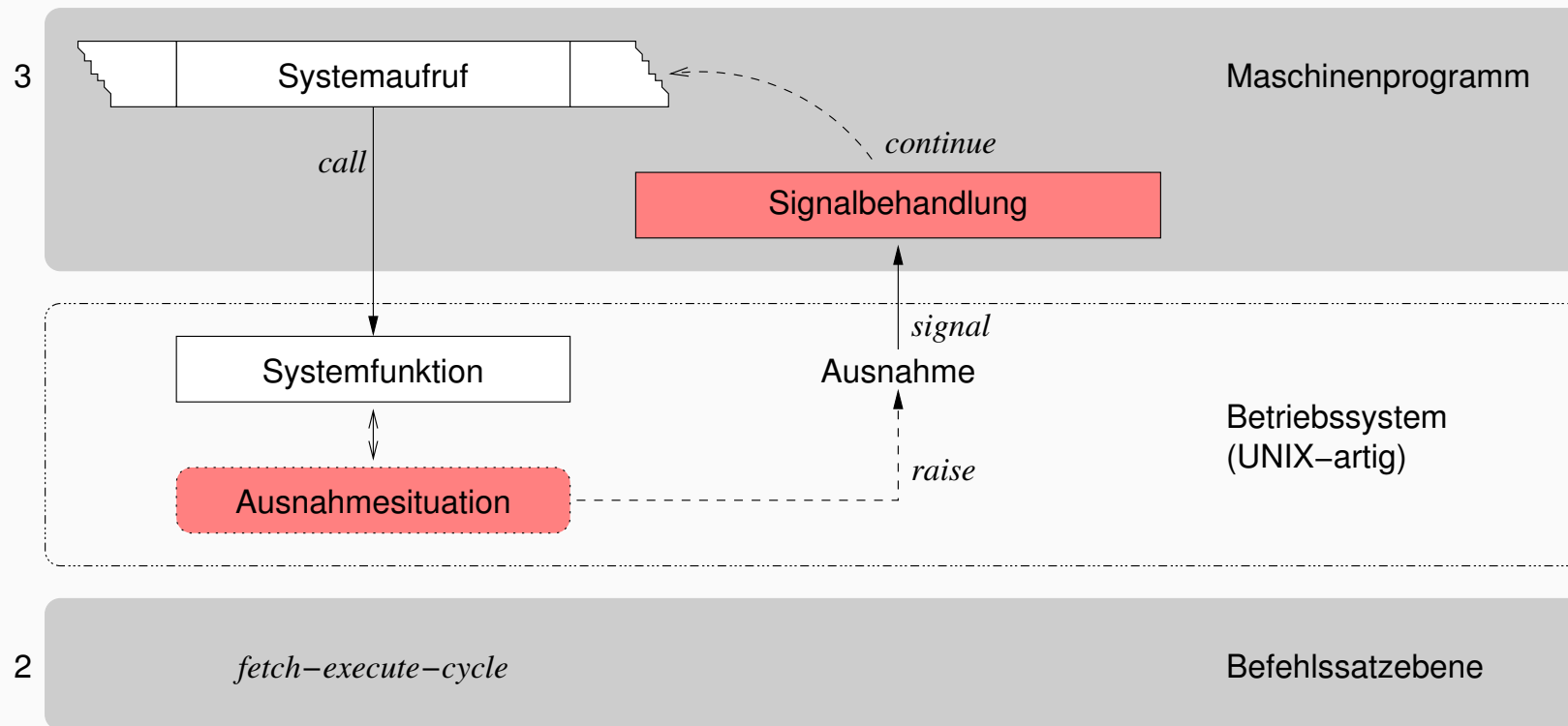


- die Ausnahmebehandlung erfolgt durch das Betriebssystem, das dazu durch die CPU aktiviert wird
 - ggf. wird die CPU instruiert, die Operation wieder aufzunehmen





- bei Ausführung der Systemfunktion tritt eine Ausnahmesituation auf, das Betriebssystem erhebt (*raise*) eine Ausnahme
 - die auf ein Signal abgebildet und zur Behandlung hoch gereicht wird



- die Signalbehandlung erfolgt im Kontext des Maschinenprogramms, sie setzt am Ende die Ausführung des Maschinenprogramms fort

Gliederung

Einführung

Schichtenstruktur

Semantische Lücke

Fallstudie

Mehrebenenmaschinen

Maschinenhierarchie

Maschinen und Prozessoren

Entvirtualisierung

Ausnahmesituation

Zusammenfassung

Resümee

- Rechensysteme zeigen eine bestimmte innere **Schichtenstruktur**
 - die **semantische Lücke** zwischen Anwendungsprogramm und Hardware
 - die Kluft zwischen gedanklich Gemeintem und sprachlich Geäußertem

- jedes Rechensystem ist als **Mehrebenenmaschine** ausgeprägt
 - eine Hierarchie virtueller Maschinen: **Interpretation** und **Übersetzung**
 - **Demarkationslinie** bzw. ein grundlegender Bruch zwischen Ebene_[3,4]
 - Methode der Abbildung, Art der Programmierung, Natur der Sprache
 - Abbildung der Schichten und Zeitpunkte der Abbildungsvorgänge
 - Betriebssysteme entvirtualisieren zur Laufzeit
 - Kunst der kleinen Schritte: semantische Lücke schrittweise schließen

- **Ausnahmesituationen** bilden Ebenenübergänge „von unten nach“
 - im Sonderfall bei der Programmausführung kooperieren die Maschinen
 - Analogie zwischen Betriebssystem und CPU: abstrakter/realer Prozessor

- ↪ ergänzend dazu zeigt der Anhang weitere **Interpretersysteme**
- **Virtualisierungssystem** realisiert als VMM (*virtual machine monitor*)

- jedes Rechensystem ist als **Mehrebenenmaschine** ausgeprägt
 - eine Hierarchie virtueller Maschinen: **Interpretation** und **Übersetzung**

Zusammenfassung

Bibliographie

Literaturverzeichnis (1)

[1] APPLE COMPUTER, INC.:

Rosetta.

In: *Universal Binary Programming Guidelines.*

Apple Computer, Inc., Jun. 2006 (Appendix A), S. 65–74

[2] CHAMBERLAIN, S. ; TAYLOR, I. L.:

Using ld: The GNU Linker.

Boston, MA, USA: Free Software Foundation, Inc., 2003

[3] CONNECTIX CORP.:

Connectix Virtual PC.

Press Release, Apr. 1997

[4] ELSNER, D. ; FENLASON, J. :

Using as: The GNU Assembler.

Boston, MA, USA: Free Software Foundation, Inc., Jan. 1994

[5] FEY, D. :

Hardwarenahe Programmierung in Assembler.

In: LEHRSTUHL INFORMATIK 3 (Hrsg.): *Grundlagen der Rechnerarchitektur und -organisation.*

FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 2

[6] GOLDBERG, R. P.:

Architectural Principles for Virtual Computer Systems / Harvard University, Electronic Systems Division.

Cambridge, MA, USA, Febr. 1973 (ESD-TR-73-105). –

PhD Thesis

[7] HABERMANN, A. N. ; FLON, L. ; COOPRIDER, L. W.:

Modularization and Hierarchy in a Family of Operating Systems.

In: *Communications of the ACM* 19 (1976), Mai, Nr. 5, S. 266–272

Literaturverzeichnis (3)

[8] RITCHIE, D. M.:

/* You are not expected to understand this. */.

<http://cm.bell-labs.com/cm/cs/who/dmr/odd.html>, 1975

[9] ROBIN, J. S. ; IRVINE, C. E.:

Analysis of the Intel Pentium's Ability to Support a Secure Virtual Machine Monitor.

In: *Proceedings of 9th USENIX Security Symposium (SSYM'00)*,
USENIX Association, 2000, S. 1–16

[10] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :

Virtuelle Maschinen.

Sept. 2013. –

Eingeladener Vortrag, INFORMATIK 2013, Workshop „Virtualisierung:
gestern, heute und morgen“, Koblenz

Literaturverzeichnis (4)

- [11] SMITH, J. E. ; NAIR, R. :
Virtual Machines: Versatile Platforms for Systems and Processes.
Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005. –
656 S. –
ISBN 9781558609105
- [12] TANENBAUM, A. S.:
Multilevel Machines.
In: Structured Computer Organization[13], Kapitel 7, S. 344–386
- [13] TANENBAUM, A. S.:
Structured Computer Organization.
Prentice-Hall, Inc., 1979. –
443 S. –
ISBN 0-130-95990-1
- [14] <http://www.hyperdictionary.com/computing/semantic+gap>

Anhang

Interpretersysteme

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren
 - real**
 - beschränkt auf Ebene₂, nämlich die **physische CPU** (z.B. x86)

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren

virtuell

- für beide jeweils durch ein spezifisches Programm in **Software**
- im Falle von Ebene₃ das **Betriebssystem** (nur partiell)
- bezüglich Ebene₂ ein **Virtualisierungssystem** (total/partiell)

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren

- gelegentlich ist aber auch **Binärübersetzung** anzufinden (z.B. [1])

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren
- dabei interpretiert das Virtualisierungssystem alle oder nur einen Teil der Befehle der Programme der virtuellen Maschine

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren

- dabei interpretiert das Virtualisierungssystem alle oder nur einen Teil der Befehle der Programme der virtuellen Maschine
 - total**
 - als **Emulator** der eigenen oder einer fremden realen Maschine [3]
 - „*complete software interpreter machine*“ (CSIM, [6, S. 21])

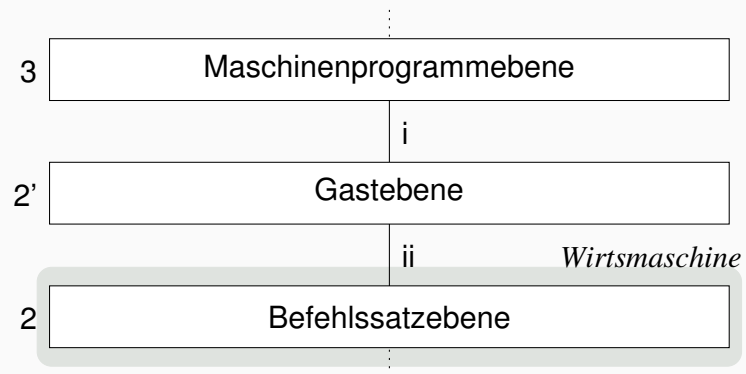
Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren
 - dabei interpretiert das Virtualisierungssystem alle oder nur einen Teil der Befehle der Programme der virtuellen Maschine
- partiell**
- als **virtual machine monitor** (VMM, [6, S. 21]), Typ I oder II
 - der nur „sensitive Befehle“ abfängt und (in SW) emuliert

Architektonische Prinzipien virtueller Rechnersysteme

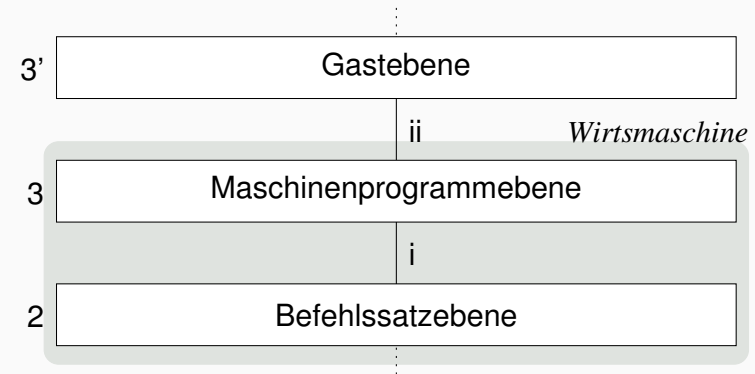
- Schichten der Ebene_[2,3] werden durch reale oder virtuelle Maschinen implementiert, die normalerweise als **Interpreter** fungieren
- dabei interpretiert das Virtualisierungssystem alle oder nur einen Teil der Befehle der Programme der virtuellen Maschine
- je nach VMM ist der Übereinstimmungsgrad von virtueller und realer Maschine (Wirt) möglicherweise unterschiedlich [6, S. 17]
 - bei **Selbstvirtualisierung** besteht 100% funktionale Übereinstimmung
 - im Gegensatz zur **Familienvirtualisierung**, bei der die virtuelle Maschine lediglich Mitglied der Rechnerfamilie der Wirtsmaschine ist

■ Typ I VMM



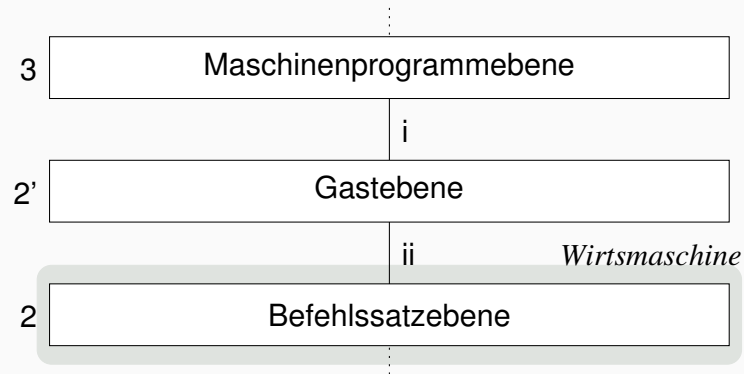
- läuft auf einer „nackten“ Wirtsmaschine
- unter keinem Betriebssystem

■ Typ II VMM

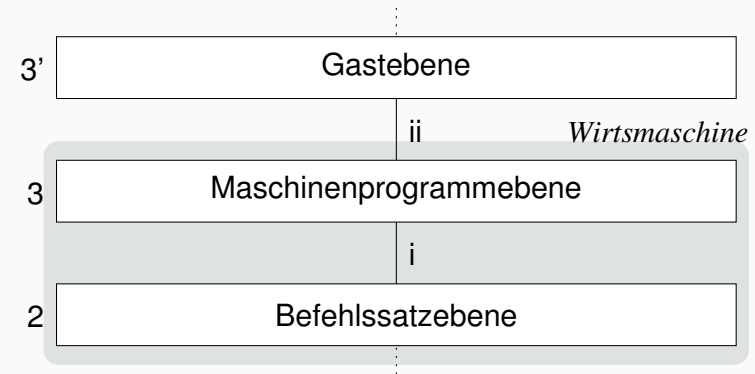


- läuft auf einer erweiterten Wirtsmaschine
- unter dem Wirtsbetriebssystem

■ Typ I VMM



■ Typ II VMM



- beiden gemeinsames Operationsprinzip ist die **Teilinterpretation**:
 - i durch das Betriebssystem (Typ I) bzw. Wirtsbetriebssystem (Typ II)
 - ii durch den VMM

- Gegenstand der Teilinterpretation sind **sensitive Befehle**
 - jeder Befehl, dessen direkte Ausführung durch die VM nicht tolerierbar ist
 - privilegierte Befehle ausgeführt im unprivilegierten Modus \rightsquigarrow *Trap*
 - aber leider auch unprivilegierte Befehle mit kritischen Seiteneffekten

Virtualisierbare Reale Maschine

Virtualisierbare Reale Maschine

- typische Anforderungen an die Befehlssatzebene [6, S. 47–53]:
 1. annähernd äquivalente Ausführung der meisten unprivilegierten Befehle im System- und Anwendungsmodus des Rechnersystems
 2. Schutz von Programmen, die im Systemmodus ausgeführt werden
 3. Abfangvorrichtung („Falle“, *trap*) für **sensitive Befehle**:
 - a Änderung/Abfrage des Systemzustands (z.B. Arbeitsmodus des Rechners)
 - b Änderung/Abfrage des Zustands reservierter Register oder Speicherstellen
 - c Referenzierung des (für 2. erforderlichen) Schutzsystems
 - d Ein-/Ausgabe

- **unprivilegierte sensitive Befehle** sind kritisch

2. Schutz von Programmen, die im Systemmodus ausgeführt werden
3. Abfangvorrichtung („Falle“, *trap*) für **sensitive Befehle**:
 - b Änderung/Abfrage des Zustands reservierter Register oder Speicherstellen
 - c Referenzierung des (für 2. erforderlichen) Schutzsystems

■ **unprivilegierte sensitive Befehle** sind kritisch, **Intel Pentium [9]**:

verletzt 3.b

- SGDT, SIDT, SLDT; [SMSW;] POPF, PUSHF

verletzt 3.c

- LAR, LSL, VERR, VERW; POP, PUSH; STR, MOVE
- CALL, INT *n*, JMP, RET

- **unprivilegierte sensitive Befehle** sind kritisch
 - bei Vollvirtualisierung (VMware), ist **partielle Binärübersetzung** eine Lösung, oder eben **Paravirtualisierung** (VM/370, Denali, Xen)
 - in beiden Fällen sind aber Softwareänderungen unvermeidbar, entweder am Maschinenprogramm oder am Betriebssystem

Transparenz für das Betriebssystem

Transparenz für das Betriebssystem

- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent
 - bis auf Zeitmessung hat das Betriebssystem sonst keine Möglichkeit, in Erfahrung zu bringen, ob es eine virtuelle oder reale Maschine betreibt
 - vorausgesetzt der Abwesenheit (unprivilegierter) sensitiver Befehle und damit der Nichterfordernis von Binärübersetzung
- ↪ Betriebssystem und VMM wissen nicht voneinander

Transparenz für das Betriebssystem

- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent

- anders verhält es sich mit **Paravirtualisierung** \rightsquigarrow intransparent
 - Grundidee dabei ist, dass das Betriebssystem gezielt mit dem VMM in Interaktion tritt und bewusst auf Transparenz verzichtet

Transparenz für das Betriebssystem

- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent

- anders verhält es sich mit **Paravirtualisierung** \rightsquigarrow intransparent
 - Grundidee dabei ist, dass das Betriebssystem gezielt mit dem VMM in Interaktion tritt und bewusst auf Transparenz verzichtet
 - Hintergrund ist die **Deduplikation** von Funktionen aber auch Daten, die sowohl im Betriebssystem als auch im VMM vorhanden sein müssen
 - Betriebsmittelverwaltung, Gerätetreiber, Prozessorsteuerung, ...

Transparenz für das Betriebssystem

- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent

- anders verhält es sich mit **Paravirtualisierung** \rightsquigarrow intransparent
 - Grundidee dabei ist, dass das Betriebssystem gezielt mit dem VMM in Interaktion tritt und bewusst auf Transparenz verzichtet
 - Hintergrund ist die **Deduplikation** von Funktionen aber auch Daten, die sowohl im Betriebssystem als auch im VMM vorhanden sein müssen
 - Betriebsmittelverwaltung, Gerätetreiber, Prozessorsteuerung, ...
 - weiterer Aspekt ist die damit einhergehende Reduktion von Gemeinkosten (*overhead*) durch Wegfall der Teilinterpretation des Betriebssystems

Transparenz für das Betriebssystem

- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent

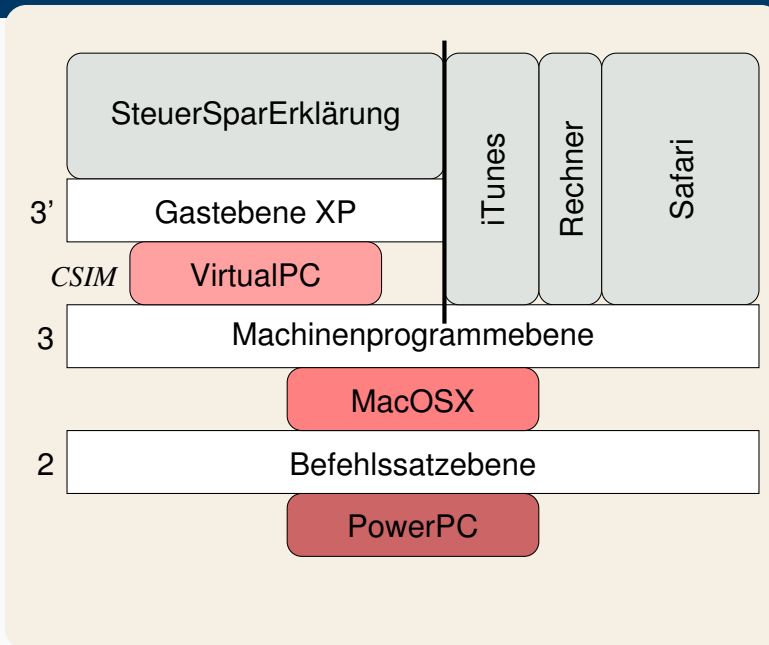
- anders verhält es sich mit **Paravirtualisierung** \rightsquigarrow intransparent
 - Grundidee dabei ist, dass das Betriebssystem gezielt mit dem VMM in Interaktion tritt und bewusst auf Transparenz verzichtet
 - Hintergrund ist die **Deduplikation** von Funktionen aber auch Daten, die sowohl im Betriebssystem als auch im VMM vorhanden sein müssen
 - Betriebsmittelverwaltung, Gerätetreiber, Prozessorsteuerung, ...
 - weiterer Aspekt ist die damit einhergehende Reduktion von Gemeinkosten (*overhead*) durch Wegfall der Teilinterpretation des Betriebssystems
 - in dem Zusammenhang werden im Betriebssystem ursprünglich enthaltene sensitive Befehle als Elementaroperationen des VMM repräsentiert

Transparenz für das Betriebssystem

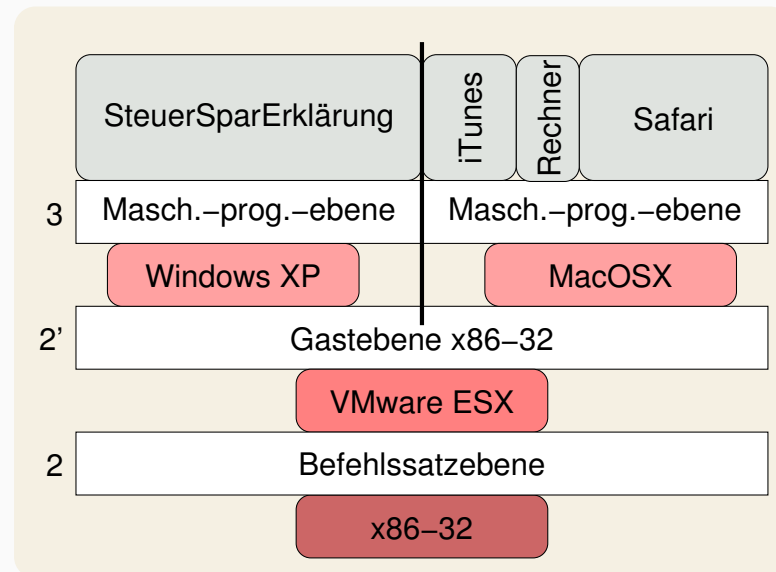
- **Vollvirtualisierung** (Selbstvirtualisierung) ist funktional transparent

- anders verhält es sich mit **Paravirtualisierung** \rightsquigarrow intransparent
 - Grundidee dabei ist, dass das Betriebssystem gezielt mit dem VMM in Interaktion tritt und bewusst auf Transparenz verzichtet

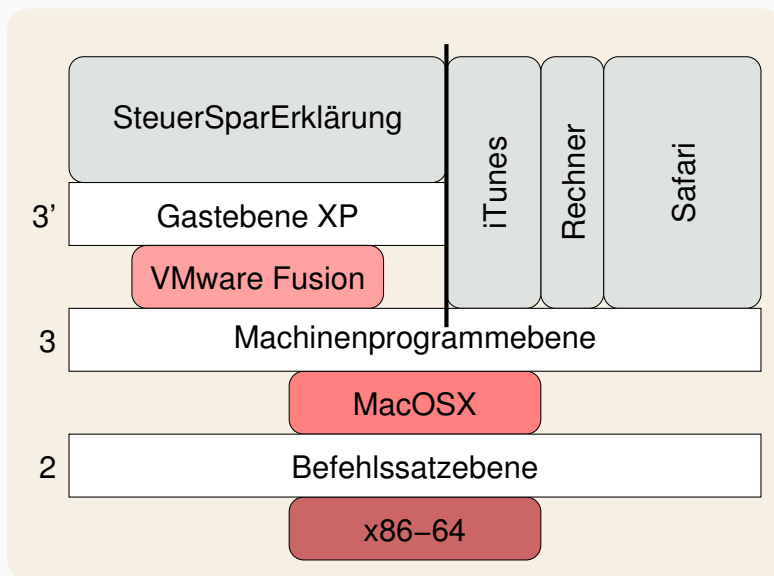
↔ Betriebssystem und VMM gehen eine Art **Symbiose** ein



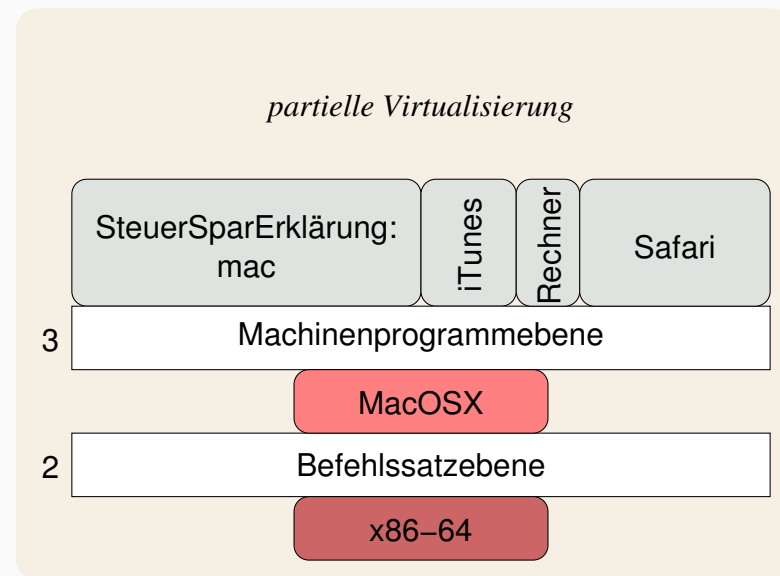
Anwendungsbeispiele

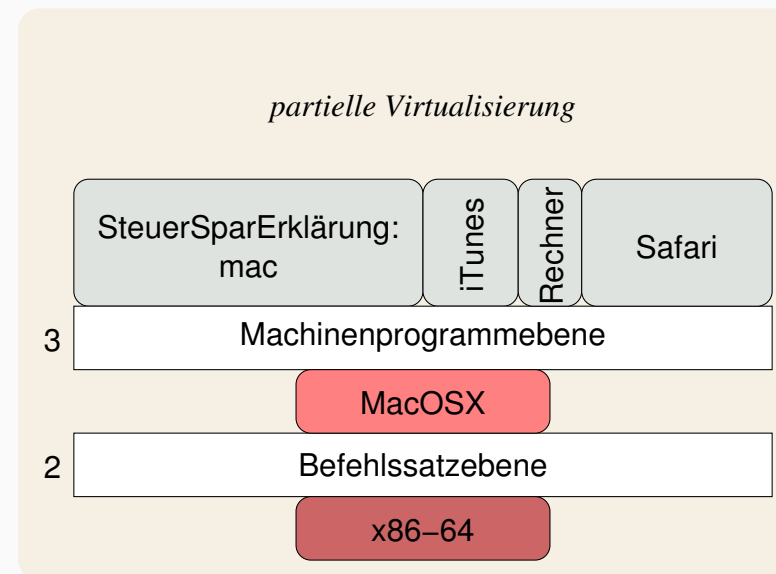
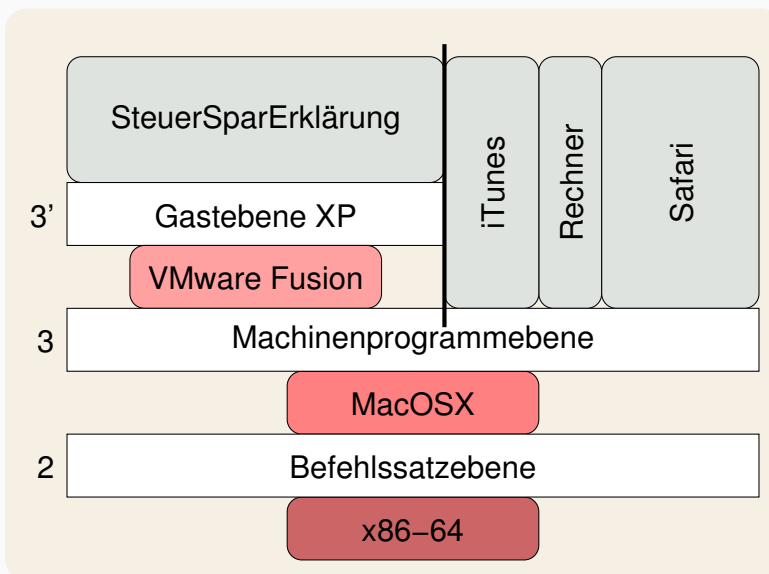
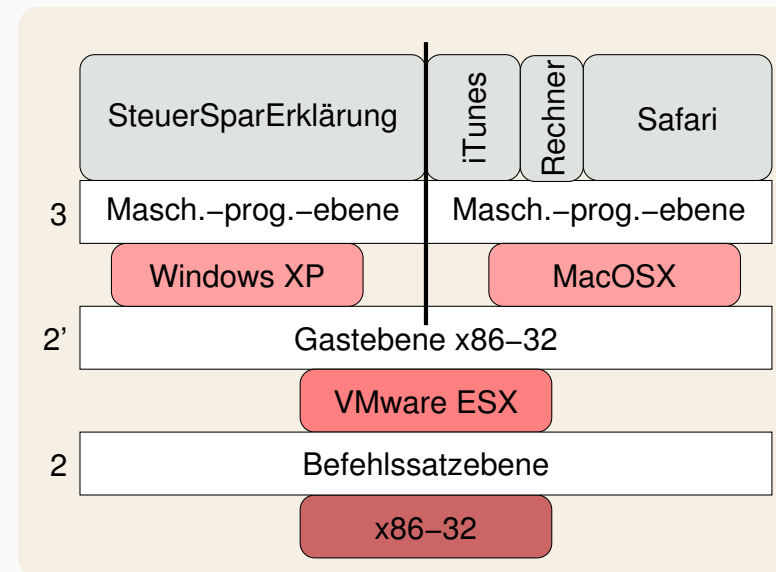
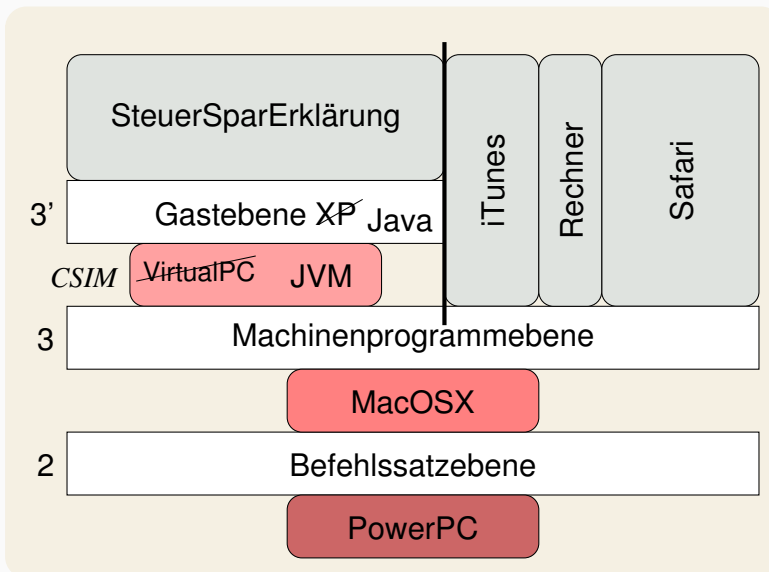


Anwendungsbeispiele



Anwendungsbeispiele





partielle Virtualisierung