



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Labor

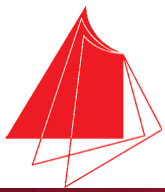
Systemnahes Programmieren

Prof. Dr. Thomas Fuchß

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik





Übersicht

- **Veranstaltungen**
 - jeweils mittwochs von 14.00 – 19.00 Uhr (Li137 / E311)
- **Zeitplan**
 - Phase I (Scanner) 7 Termine (18.03. – 29.04.)
 - Phase II (Parser) 8 Termine (06.05. – 01.07.)
- **Werkzeuge und Sprachen**
 - C, C++ und **keine Datenstrukturen aus der STL**
 - **Eclipse CDT**
 - **Linux**



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

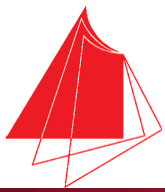
Systemnahes Programmieren Teil II Parser

Prof. Dr. Thomas Fuchß

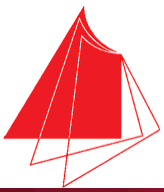
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik





- A.V. Aho, M.S. Lam, R. Sethi und J.D. Ullmann.
Compiler – Prinzipien, Techniken und Werkzeuge – 2nd Edition – München: PEARSON STUDIUM, 2008
- M. Kerrisk.
The Linux Programming Interface: A Linux and UNIX System Programming Handbook – No Starch Press, 2010
- N. Wirth.
Grundlagen und Techniken des Compilerbaus – Addison-Wesley, 1996
- B. Bauer und R. Höllerer.
Übersetzung objektorientierter Programmiersprachen : Konzepte, abstrakte Maschinen und Praktikum "Java-Compiler" – Springer, 1998
- D. Grune et. al.
Modern compiler design – Wiley, 2000
- R. M. Stallman, R. McGrath, P. D. Smith
GNU Make – Free Software Foundation, 2010(www.gnu.org/software/make/manual/)

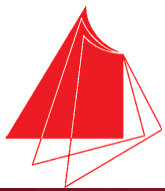


Ziel:

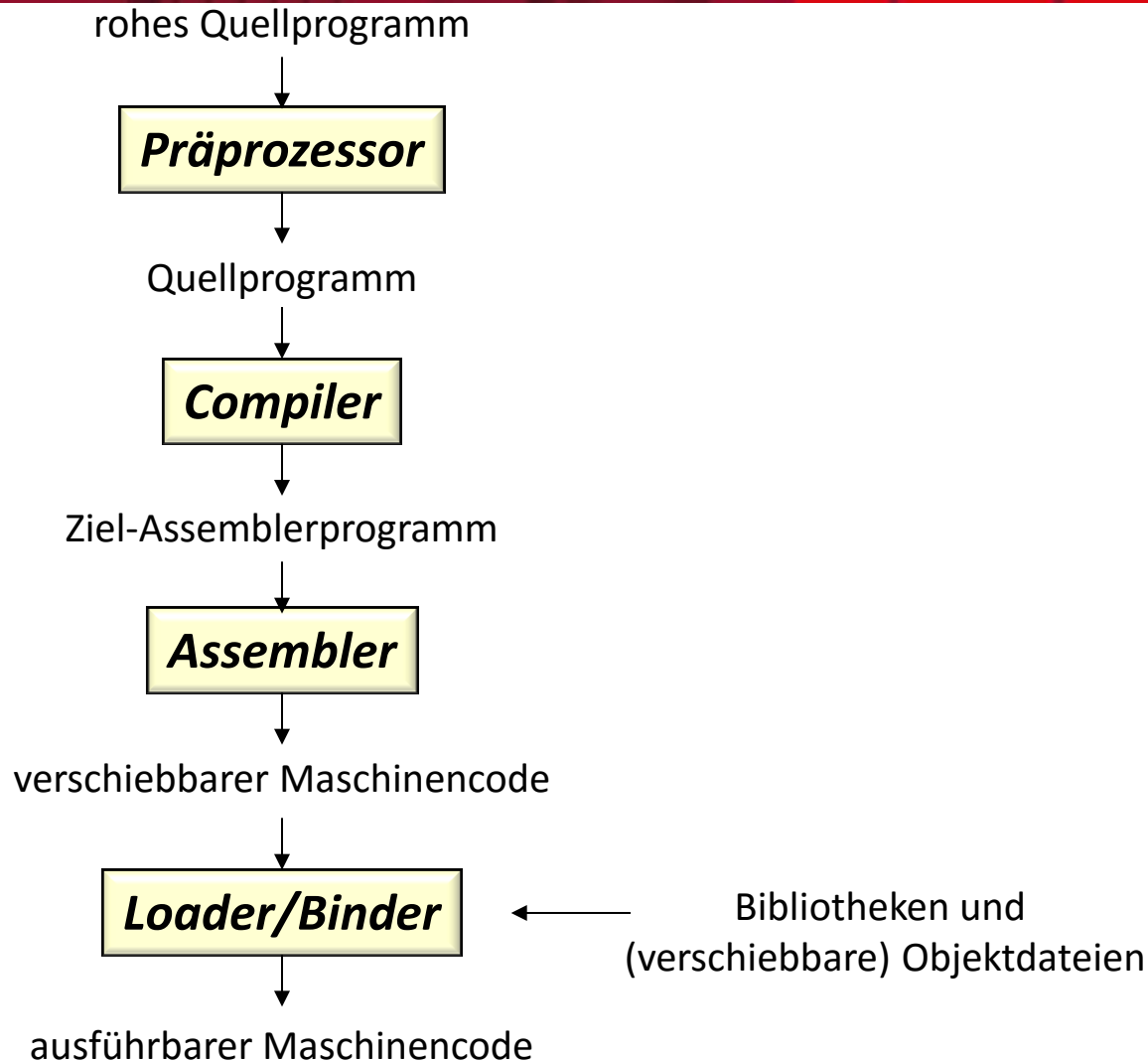
Ziel der zweiten Laboraufgabe ist es, die Funktionsweise eines Parsers sowie dessen Einordnung innerhalb eines Compilers kennen zu lernen.

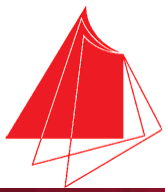
Insbesondere gilt es, das Prinzip des *rekursiven Abstiegs* verstehen und anwenden zu können.

Semantische Analyse und beispielhafte Code-Erzeugung runden die Aufgabe ab.



Die Umgebung eines Compilers





Das Analyse-Synthesemodell

Der Übersetzungsprozess besteht aus zwei Teilen:

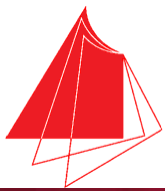
- **Analyse: (Frontend)**

Der Analyse-Teil zerlegt das Quellprogramm in seine Bestandteile und erzeugt eine Zwischendarstellung

- **Synthese: (Backend)**

Der Synthese-Teil konstruiert das gewünschte Zielprogramm aus der Zwischendarstellung

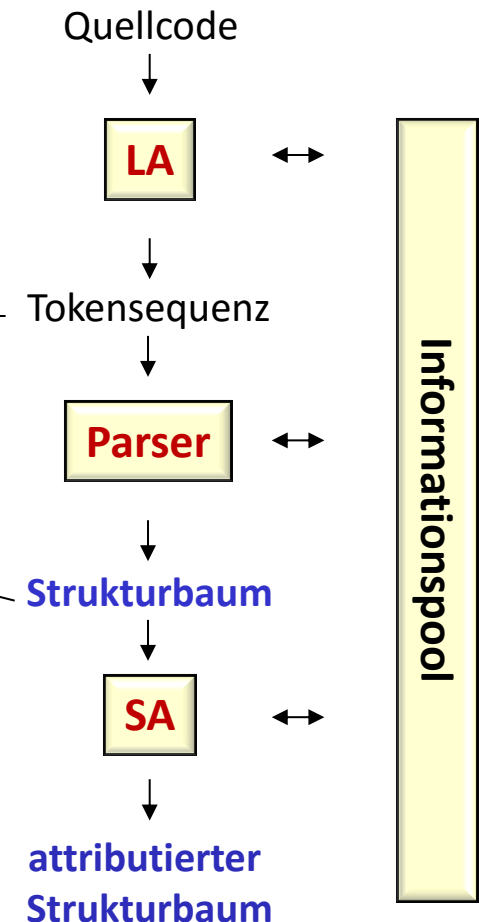
- Code-Erzeugung
- Optimierung

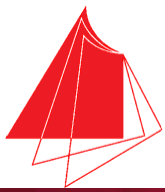


Die Analyse

Die Analyse besteht ihrerseits aus mehreren Teilaufgaben

- **Lexikalische Analyse:**
 - Zerlegung des Quellcodes in die Grundsymbole (Tokens)
Bezeichner, Schlüsselworte, Sonderzeichen, Zahlen, ...
 - Speichern und Weiterleiten von Informationen (Namen, Values)
- **Syntaktische Analyse:**
 - Überprüfung der syntaktischen Spracheigenschaften
Sind die Ausdrücke korrekt? $a = b - : + c;$
 - Erstellung des Strukturbaums
- **Semantische Analyse:**
 - Bestimmung der statischen Semantik des Programms
 - Prüfung der Konsistenz
 - Gültigkeitsbereiche (Namensräume)
 - Typisierung (Ausdrücke, Variablen, ...)
 - Deklarationen



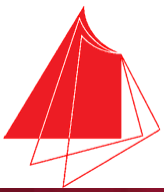


Was macht man mit der Token-Sequenz?

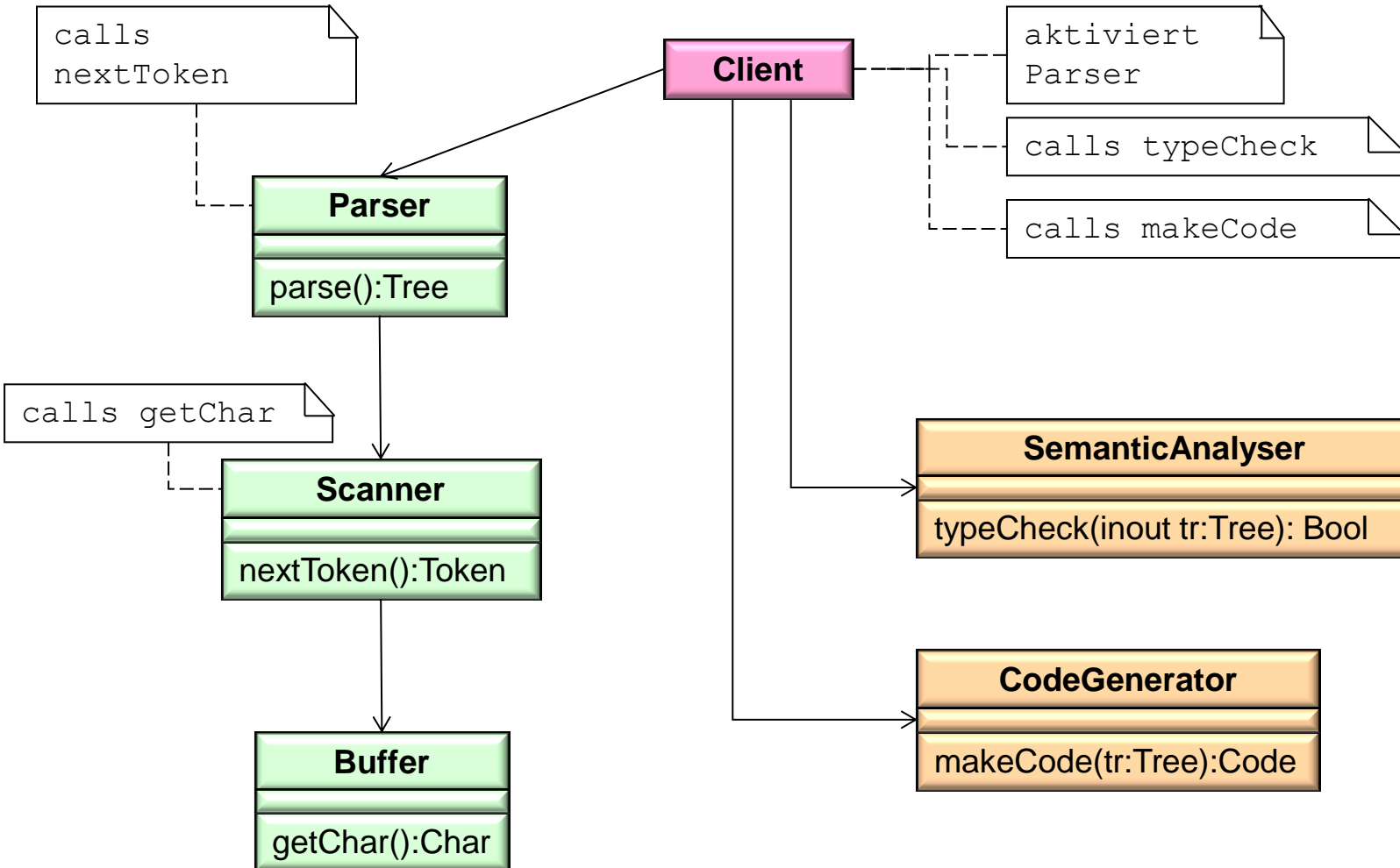
Zu jeder Programmiersprache gehören Regeln, die festlegen, wie die syntaktische Struktur wohlgeformter Programme auszusehen hat.

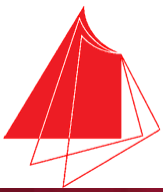
Der Parser überprüft diese Regeln.

- Der Parser fordert die Tokens vom Scanner an
- Der Parser prüft, ob die Reihenfolge der Tokens sinnvoll ist (den Regeln der Programmiersprache entspricht)
- Der Parser baut den Strukturbaum (Parse Tree) auf, der in der semantischen Analyse zur Typprüfung genutzt wird.
- Der Parser erkennt und behandelt Fehler.

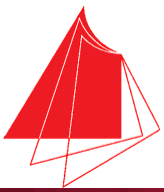


Ablauf: (funktionale Referenzarchitektur)





Was soll man tun?



Aufgaben:

a) Schreiben Sie einen Parser für folgende Grammatik mit Startsymbol PROG.

PROG ::= DECLS STATEMENTS

DECLS ::= DECL ; DECLS | ε

DECL ::= **int** ARRAY *identifier*

ARRAY ::= [*integer*] | ε

STATEMENTS ::= STATEMENT ; STATEMENTS | ε

STATEMENT ::= *identifier* INDEX := EXP | **write**(EXP) | **read** (*identifier* INDEX) | { STATEMENTS } |
if (EXP) STATEMENT **else** STATEMENT |
while (EXP) STATEMENT

EXP ::= EXP2 OP_EXP

EXP2 ::= (EXP) | *identifier* INDEX | *integer* | - EXP2 | ! EXP2

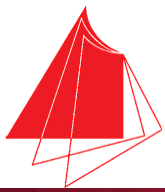
INDEX ::= [EXP] | ε

OP_EXP ::= OP EXP | ε

OP ::= + | - | * | : | < | > | = | <: > | &

Hinweis:

- normale Terminale (Schlüsselworte) sind klein, **fett** und *rot*
- kleine, **fette**, *kursive* und blaue Terminale stehen für Konstanten bzw. Bezeichner (3, 3.14, x,...).
- Nichtterminale sind groß und *KURSIV* gedruckt



Aufgaben:

b) Verwenden Sie hierzu den Scanner aus Teil 1 und ergänzen Sie die fehlenden Terminalsymbole.

digit ::= „0“ | „1“ | „2“ | „3“ | „4“ | „5“ | „6“ | „7“ | „8“ | „9“

letter ::= „A“ | „B“ | „C“ | ... | „Z“ | „a“ | „b“ | ... | „z“ |

sign+ ::= „+“

...

... ::= „-“ „*“ „:“ „<“ „>“ „=“ „:=“ „<:>“ „!“ „&“ „;“ „(“ „)“ „{“ „}“ „[“

...

sign] ::= „]“

integer ::= digit {digit}

identifizier ::= letter {letter | digit}

write ::= „write“

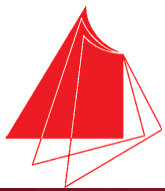
read ::= „read“

if ::= „if“ | „IF“

else ::= „else“ | „ELSE“

while ::= „while“ | „WHILE“

int ::= „int“

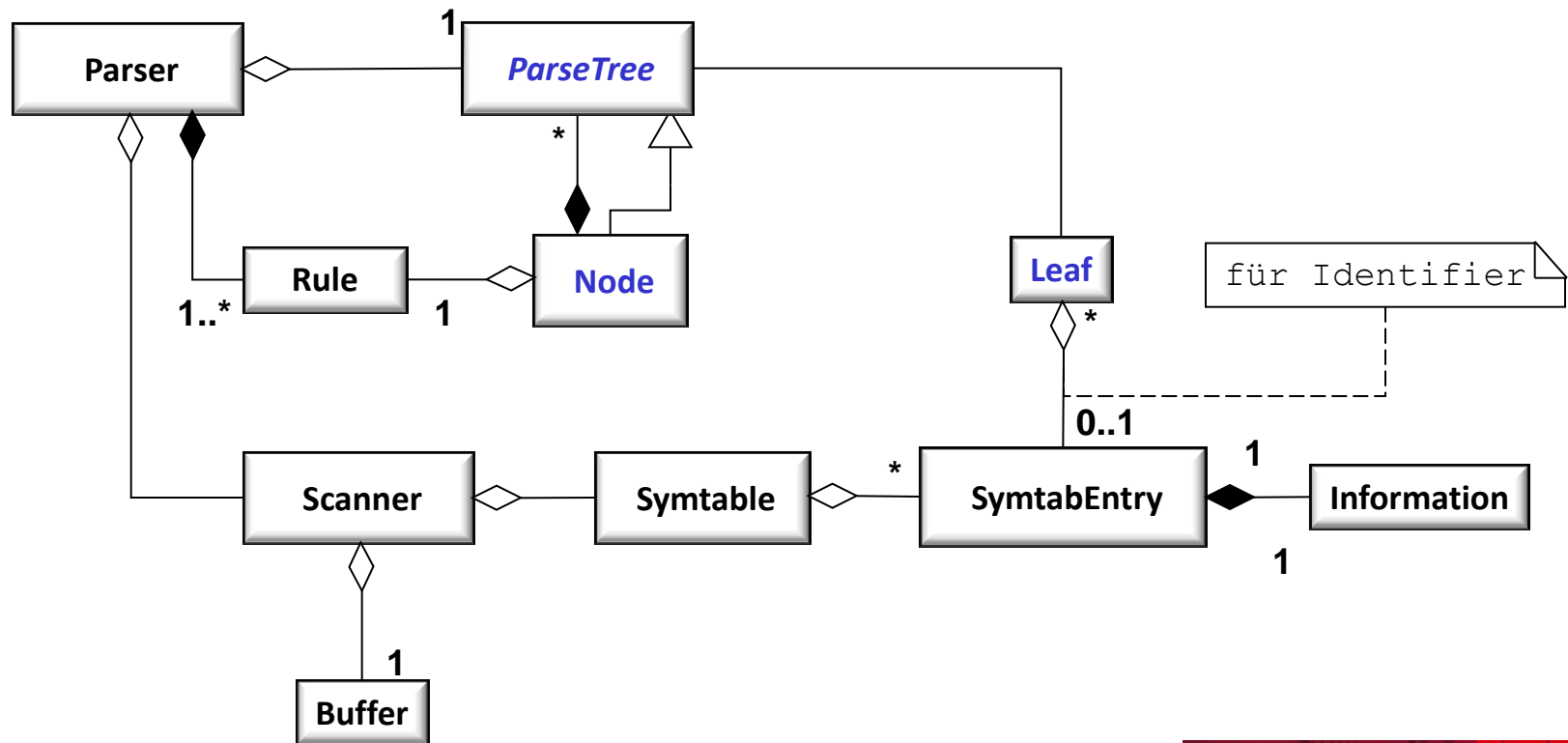


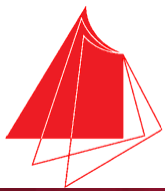
Aufgaben:

c) Erstellen Sie einen Strukturbaum (Parse-Baum).

Erweitern Sie hierzu die Funktionen des Parsers, so dass sie nicht nur die Syntax überprüfen, sondern auch den Baum aufbauen.

(Bem.: Für jede erkannte Regel entsteht ein neuer Teilbaum)





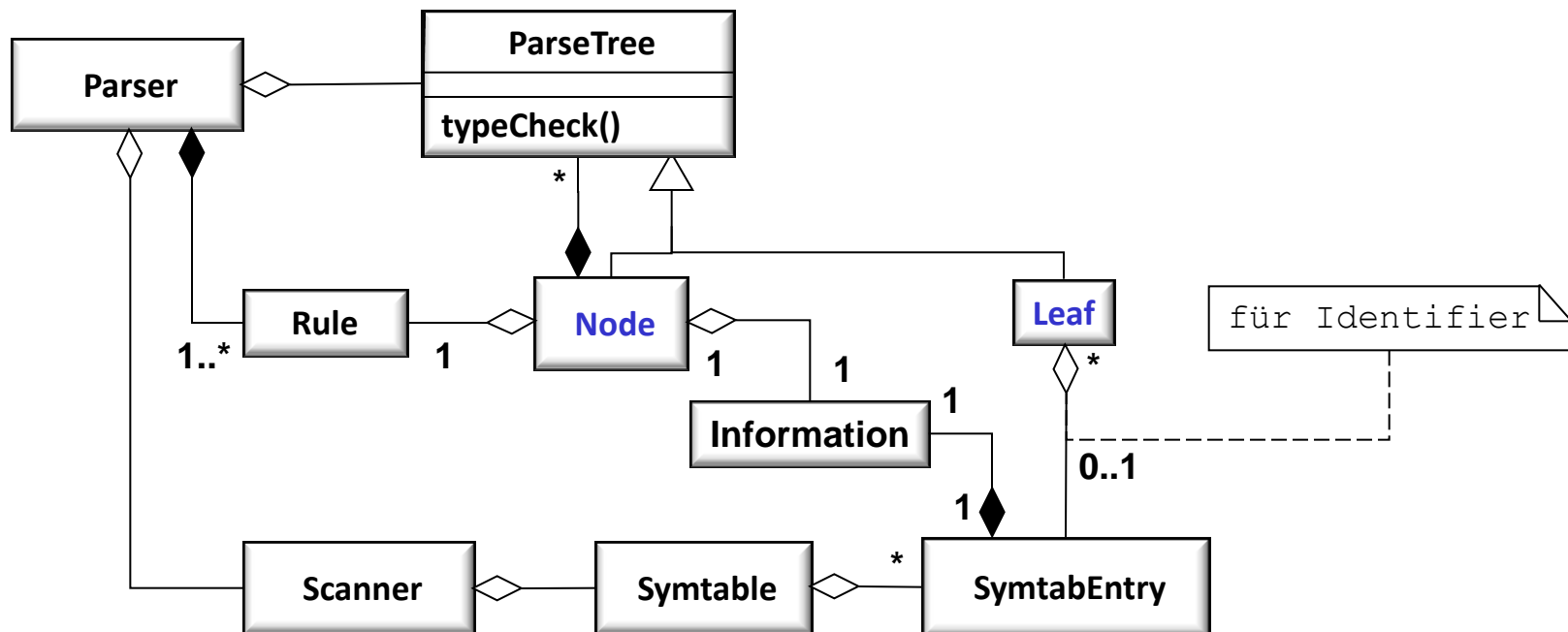
Aufgaben:

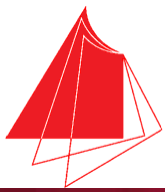
d) Evaluieren Sie den Parse-Baum :

Ermitteln Sie hierzu zu jedem Knoten den entsprechenden Typ (gemäß Vorlage) und prüfen Sie, ob die Typen der Unterbäume zusammenpassen.

Speichern Sie die Typ-Information im Knoten und für **Identifizier als Information in der Symboltabelle**.

Hinweis: Erweitern Sie hierzu die Klasse *ParseTree* um eine Operation **typeCheck**.



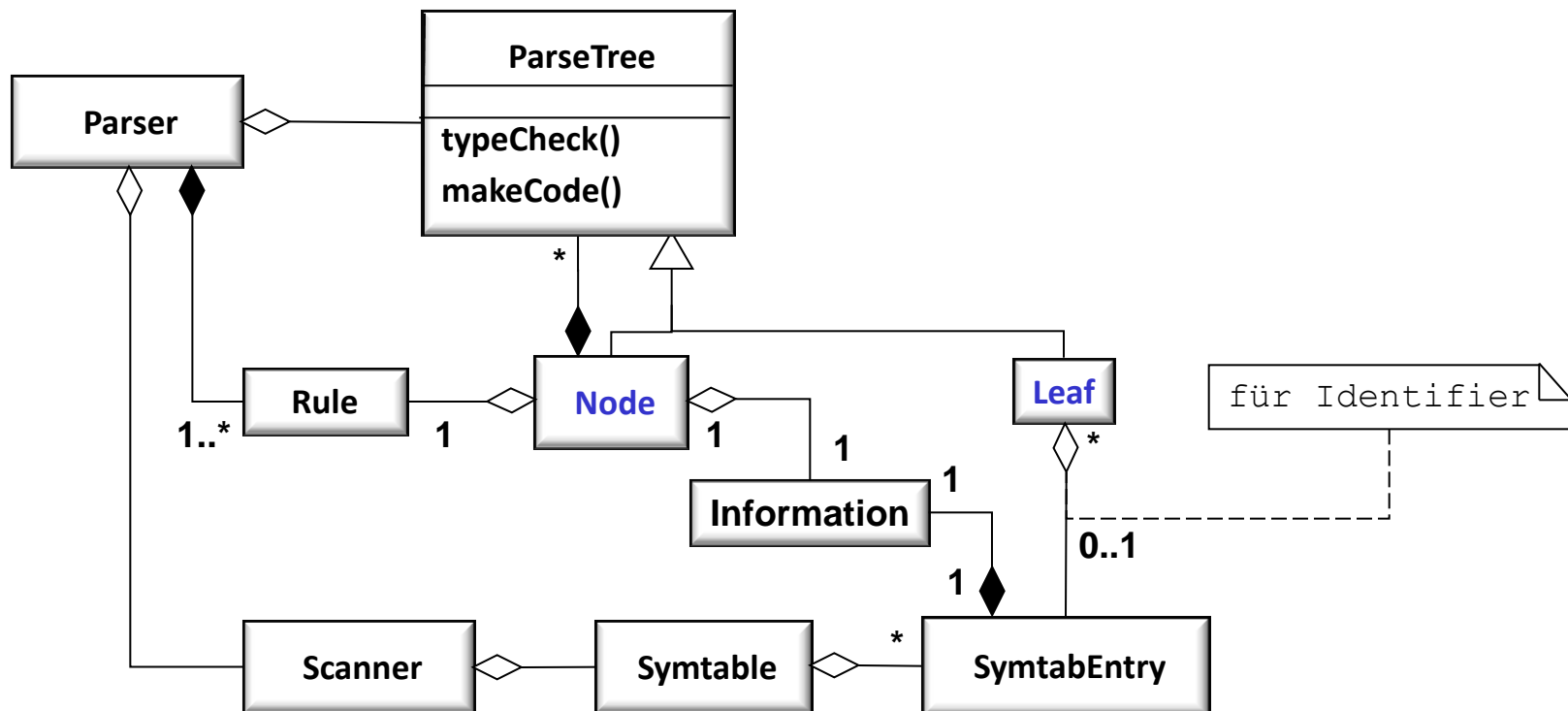


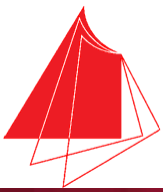
Aufgaben:

e) Erzeugen Sie Code

Bestimmen Sie hierzu zu jedem Knoten das entsprechende Code-Segment (gemäß Vorlage) und speichern Sie dieses in einer Code-Datei (xxx.code) ab.

Hinweis: Erweitern Sie hierzu die Klasse *ParseTree* um eine Operation **makeCode**.





Programmaufruf (I)

```
C:\> parser Parser-test.txt -c test.code
```

- „Parser-test.txt“ Eingabedatei mit dem zu parsenden Programm.

```
int n;  
int[3] m;  
n := 3 + 4;  
n := 3*n--5;  
write(n);
```

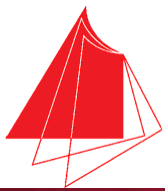
„Parser-test.txt“

```
C:\>parser parser-test.txt -c test.code
```

```
parsing ...
```

```
type checking ...
```

```
generate code ...
```



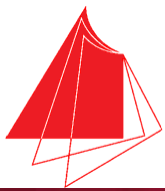
Programmaufruf (II)

Die resultierende Code-Datei hat dann etwa folgende Gestalt:

Um Code-Files zu interpretieren verwenden Sie den zur Verfügung gestellten „Interpreter“.

```
> java -jar interpreter.jar
```

```
DS $n 1
DS $m 3
LC 3
LC 4
ADD
LA $n
STR
LC 3
LA $n
LV
LC 0
LC 5
SUB
SUB
MUL
LA $n
STR
LA $n
LV
PRI
NOP
STP
„test.code“
```



Programmaufruf (III)

```
C:\> parser Parser-error.txt -c test.code
```

- „Parser-test.txt“ Eingabedatei mit dem zu parsenden Programm.
- Gefundene Fehler werden mit Angabe von Zeile, Spalte, Token auf „**stderr**“ ausgegeben.

```
...
```

```
    n := 3 ) 4;
```

```
...
```

„Parser-error.txt“

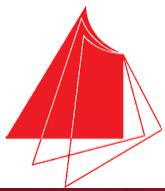
```
C:\>parser parser-error.txt
```

```
parsing ...
```

```
unexpected Token Line:      3   Column:      8   TokenRightParenthesis
```

```
stop
```

```
C:\>
```



Programmaufruf (IV)

```
C:\> parser Parser-error.txt -c test.code
```

- „Parser-test.txt“ Eingabedatei mit dem zu parsenden Programm.
- Gefundene Fehler werden mit Angabe von Zeile, Spalte, Token auf „**stderr**“ ausgegeben.

```
...
```

```
    n := 3 + m;
```

```
...
```

„Parser-error.txt“

```
C:\>parser parser-error.txt
```

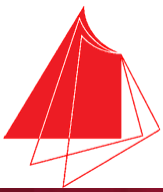
```
parsing ...
```

```
type checking ...
```

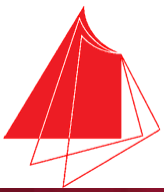
```
error Line: 3 Column: 10 not a primitive Type
```

```
stop
```

```
C:\>
```

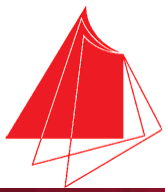


Wie soll man das tun?



Warum sehen die Regeln so seltsam aus?

```
PROG      ::=  DECLS STATEMENTS
DECLS     ::=  DECL ; DECLS | ε
DECL      ::=  int ARRAY identifier
ARRAY     ::=  [ integer ] | ε
STATEMENTS ::=  STATEMENT ; STATEMENTS | ε
STATEMENT ::=  identifier INDEX := EXP | write( EXP ) | read ( identifier INDEX ) | {STATEMENTS} |
               if ( EXP ) STATEMENT else STATEMENT |
               while ( EXP ) STATEMENT
EXP        ::=  EXP2 OP_EXP
EXP2       ::=  ( EXP ) | identifier INDEX | integer | - EXP2 | ! EXP2
INDEX      ::=  [ EXP ] | ε
OP_EXP     ::=  OP EXP | ε
OP         ::=  + | - | * | : | < | > | = | <:> | &
```



Und nicht so?

PROG ::= *DECLS ; STATEMENTS* | *STATEMENTS ;* | ε

DECLS ::= *DECL ; DECLS* | *DECL*

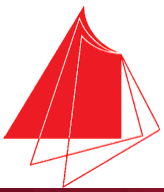
DECL ::= **int** [*integer*] *identifier* | **int** *identifier*

STATEMENTS ::= *STATEMENT ; STATEMENTS* | *STATEMENT*

STATEMENT ::= *identifier* **:=** *EXP* | *identifier* [*EXP*] **:=** *EXP* | { *STATEMENTS* }
write(*EXP*) | **read** (*identifier*) | **read** (*identifier* [*EXP*]) |
if (*EXP*) *STATEMENT* **else** *STATEMENT* |
while (*EXP*) *STATEMENT*

EXP ::= *EXP OP EXP* | (*EXP*) | *identifier* | *integer* | - *EXP* | ! *EXP*

OP ::= + | - | * | : | < | > | = | <:> | &



Wie überprüft man ein Wort?

Ist **id := id + id * id** ein Element der Sprache unserer Grammatik ?

Idee:

konstruktiv, man sucht eine Ableitung

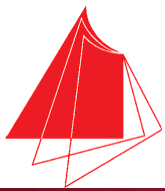
s

$\vdash^1 \text{id} := e$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e \text{ op } e$
$\vdash^1 \text{id} := \text{id op } e \text{ op } e$	$\vdash^1 \text{id} := \text{id} + e \text{ op } e$	$\vdash^1 \text{id} := \text{id} + \text{id op } e$
$\vdash^1 \text{id} := \text{id} + \text{id} * e$	$\vdash^1 \text{id} := \text{id} + \text{id} * \text{id}$	

oder

$\vdash^1 \text{id} := e$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e \text{ op } e$
$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e \text{ op } \text{id}$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } e * \text{id}$	$\vdash^1 \text{id} := e \text{ op } \text{id} * \text{id}$
$\vdash^1 \text{id} := e + \text{id} * \text{id}$	$\vdash^1 \text{id} := \text{id} + \text{id} * \text{id}$	

...



Wie findet man eine Ableitung?

Man versucht sie zu konstruieren.

Der allgemeine LL-Akzeptor (Kellermaschine)

$G = (N, T, P, Z)$ kontextfreie Grammatik, bestehend aus:

Nichtterminalen, Terminalen, Produktionen, Startsymbol

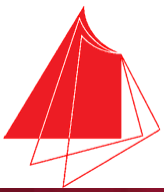
$$A_{LL}(G) = (\{\mathbf{q}\}, N, T, P_{LL}, Z\mathbf{q}, \mathbf{q})$$

$$P = \{t \mathbf{q} \mid t \vdash^1 \mathbf{q} \mid t \in T\} \quad \text{compare}$$

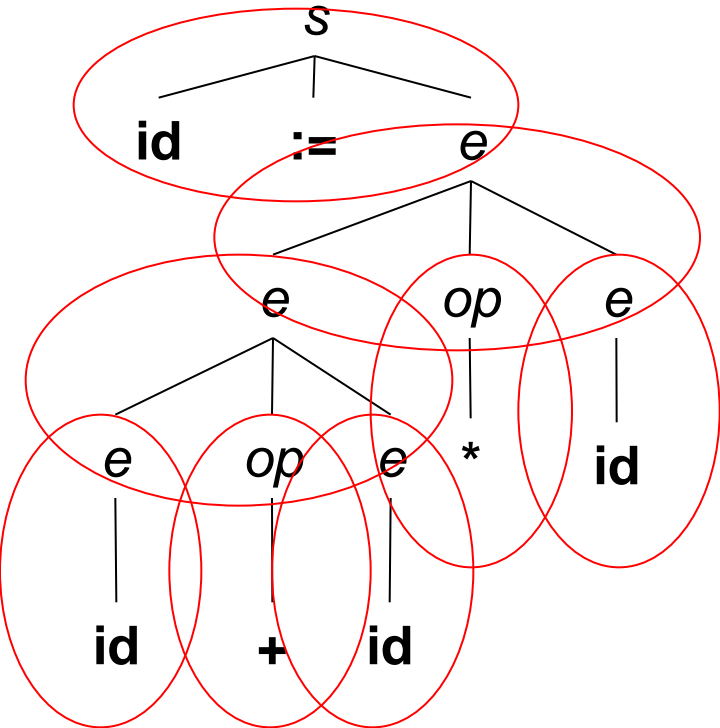
$$\cup \{B \mathbf{q} \vdash^1 b_n \dots b_1 \mathbf{q} \mid B ::= b_1 \dots b_n \in P\} \quad \text{produce}$$

Zusammenhang: $w \in L(G)$ gdw. $Z \mathbf{q} w \vdash \mathbf{q}$

Nachteil: nicht deterministisch



Beispiel



$\underline{S} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} := \text{id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \text{ } \mathbf{e} := \text{id} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} := \text{id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \text{ } \mathbf{e} := \mathbf{q} := \text{id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \underline{\mathbf{e}} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \underline{\mathbf{e}} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \underline{\mathbf{e}} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \text{ id } \mathbf{q} \text{ id} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \text{ } \mathbf{q} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{+} \text{ } \mathbf{q} + \text{id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \underline{\mathbf{e}} \text{ } \mathbf{q} \text{ id} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \text{ id } \mathbf{q} \text{ id} * \text{id}$

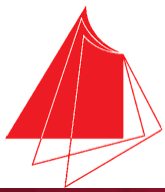
$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{op} \text{ } \mathbf{q} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \mathbf{e} \text{ } \mathbf{*} \text{ } \mathbf{q} * \text{id}$

$\vdash^{-1} \underline{\mathbf{e}} \text{ } \mathbf{q} \text{ id}$

$\vdash^{-1} \text{ id } \mathbf{q} \text{ id}$

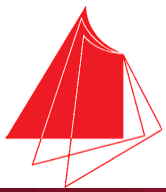
$\vdash^{-1} \mathbf{q}$



Wie wird die Ableitung eindeutig?

Im Allgemeinen gar nicht. Es gibt jedoch eine Reihe von Grammatiken, die eine eindeutige Ableitung ermöglichen. Z. B. kann **die Auswahl der Produce-Schritte über eine Vorausschau geklärt werden.**

Auf was muss man bei einer Vorausschau achten?



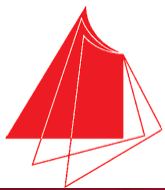
Beispiel

- $S ::= A B \quad | \quad C ? S$
- $A ::= B C$
- $B ::= + A B \quad | \quad -$
- $C ::= \$ C D \quad | \quad \varepsilon$
- $D ::= (S) \quad | \quad id$

(S ist das Startsymbol)

Frage:

Gibt es eine Ableitung für „- -“ und „?- -“ oder „\$x- -“?



Wie wird die Ableitung eindeutig?

Man betrachtet alle terminalen Worte, die aus einem Wort (w) entstehen.

$$\text{First}(w) = \{y \in T^* \mid w \vdash y\}$$

Man betrachtet alle terminalen Worte, die nach einem Nichtterminal (A) kommen können.

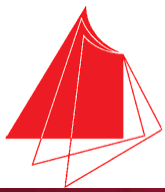
$$\text{Follow}(A) = \{y \mid y \in T^* \mid \exists z \in (N \cup T)^* \text{ mit } Z \vdash zAy\} \quad A \in N$$

Man prüft, ob für alternative Regeln ($A ::= v$ und $A ::= w$) eine eindeutige Entscheidung getroffen werden kann.

$$\text{First}(v, \text{Follow}(A)) \cap \text{First}(w, \text{Follow}(A)) = \{\}$$

$$\text{First}(r, \text{Follow}(A)) = \{y \in T^* \mid \exists z \in \text{Follow}(A) \text{ und } y \in \text{First}(rz)\} \quad A \in N, r \in (N \cup T)^*$$

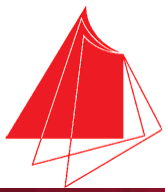
Ideal ist, wenn man nicht die ganzen Wörter vergleichen muss, sondern nur ein Anfangsstück.



Die Konstruktion von $\text{First}_1(x)$

1. Für alle $x \in T$ ist $\text{First}_1(x) = \{x\}$
2. ist $X ::= \varepsilon \in P$ dann ist auch $\# \in \text{First}_1(X)$
3. ist $X ::= y_1 \dots y_n \in P$ dann ist $\text{First}_1(y_1 \dots y_n) \subseteq \text{First}_1(X)$
4. für jedes Terminal a gilt : $a \in \text{First}_1(y_1 \dots y_n)$
gdw.
 $a \in \text{First}_1(y_1)$ oder $a \in \text{First}_1(y_i)$ für i ($1 < i \leq n$) und $\# \in \text{First}_1(y_1)$ bis $\text{First}_1(y_{i-1})$
5. $\# \in \text{First}_1(y_1 \dots y_n)$ gdw. $\# \in \text{First}_1(y_1)$ bis $\text{First}_1(y_n)$

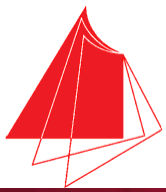
$\text{First}_1(w)$ für $w \in (N \cup T)^*$, ist die kleinste Menge, die 1-5 erfüllt.



Die Konstruktion von $\text{Follow}_1(A)$

1. $\# \in \text{Follow}_1(Z)$
2. ist $B ::= vAw \in P$ dann ist $\text{First}_1(w) \setminus \{\#\} \subseteq \text{Follow}_1(A)$
3. ist $B ::= vA$ oder $B ::= vAw \in P$ und $\# \in \text{First}_1(w)$,
dann ist $\text{Follow}_1(B) \subseteq \text{Follow}_1(A)$

$\text{Follow}_1(A)$ für $A \in N$, ist die kleinste Menge, die 1-3 erfüllt.



Beispiel

- $S ::= A B \quad | \quad C ? S$
- $A ::= B C$
- $B ::= + A B \quad | \quad -$
- $C ::= \$ C D \quad | \quad \varepsilon$
- $D ::= (S) \quad | \quad id$

$First_1(D) = \{ (, id \}$

$First_1(C) = \{ \$, \# \}$

$First_1(B) = \{ +, - \}$

$First_1(A) = First_1(B) = \{ +, - \}$

$First_1(S) = First_1(A) \cup First_1(C) \setminus \{ \# \} \cup \{ ? \} = \{ +, -, \$, ? \}$

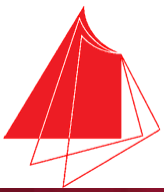
$Follow_1(S) = \{), \# \}$

$Follow_1(A) = First_1(B) = \{ +, - \}$

$Follow_1(B) = Follow_1(S) \cup First_1(C) \setminus \{ \# \} \cup Follow_1(A) = \{), \$ +, -, \# \}$

$Follow_1(C) = \{ ? \} \cup Follow_1(A) \cup First_1(D) = \{ ?, +, -, (, id \}$

$Follow_1(D) = Follow_1(C) = \{ (, id, ?, +, - \}$



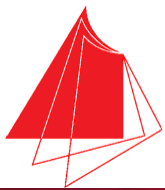
Ein impliziter Keller

Statt des expliziten Kellers eines LL-Akzeptors kann man auch den impliziten Keller rekursiver Funktionen ausnutzen. Dieses Verfahren heißt „**rekursiver Abstieg**“, und bietet sich besonders für Parser an, die man von Hand programmiert.

Für jedes Nichtterminal wird eine separate Funktion geschrieben:

seien $A ::= nBm$ und $A ::= mmC \in P$ und die Grammatik SLL(1)

```
void A() {  
  if (token ∈ First1(nBm, Follow1(A))) { // if (token == 'n')  
    next_token();  
    B();  
    if (token == 'm') { next_token(); } else { error(); }  
  }  
  else if (token ∈ First1(mmC, Follow1(A))) { // if (token == 'm')  
    next_token();  
    if (token == 'm') { next_token(); } else { error(); }  
    C();  
  }  
  else error();  
}
```



Aufgaben

a) Schreiben Sie einen Parser für folgende Grammatik mit Startsymbol PROG.

PROG ::= DECLS STATEMENTS

DECLS ::= DECL ; DECLS | ε

DECL ::= **int** ARRAY *identifizier*

ARRAY ::= [*integer*] | ε

STATEMENTS ::= STATEMENT ; STATEMENTS | ε

STATEMENT ::= *identifizier* INDEX := EXP | **write**(EXP) | **read** (*identifizier* INDEX) | { STATEMENTS } |
if (EXP) STATEMENT **else** STATEMENT |
while (EXP) STATEMENT

EXP ::= EXP2 OP_EXP

EXP2 ::= (EXP) | *identifizier* INDEX | *integer* | - EXP2 | ! EXP2

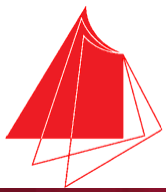
INDEX ::= [EXP] | ε

OP_EXP ::= OP EXP | ε

OP ::= + | - | * | : | < | > | = | <: > | &

Hinweis:

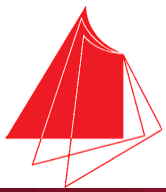
- normale Terminale (Schlüsselwörter) sind klein, **fett** und *rot*
- kleine, **fette**, *kursive* und blaue Terminale stehen für Konstanten bzw. Bezeichner (3, 3.14, x,...).
- Nichtterminale sind groß und *KURSIV* gedruckt



Aufgaben

b) Verwenden Sie hierzu den Scanner aus Teil 1 und ergänzen Sie die fehlenden Terminalsymbole.

```
digit      ::= „0“ | „1“ | „2“ | „3“ | „4“ | „5“ | „6“ | „7“ | „8“ | „9“
letter     ::= „A“ | „B“ | „C“ | ... | „Z“ | „a“ | „b“ | ... | „z“ |
sign+     ::= „+“
           ...
...        ::= „-“ „*“ „:“ „<“ „>“ „=“ „:=“ „<:>“ „!“ „&“ „;“ „(“ „)” „{“ „}“ „[“
           ...
sign]     ::= „]“
integer   ::= digit {digit}
identifier ::= letter {letter | digit}
write     ::= „write“
read      ::= „read“
if        ::= „if“ | „IF“
else      ::= „else“ | „ELSE“
while     ::= „while“ | „WHILE“
int       ::= „int“
```

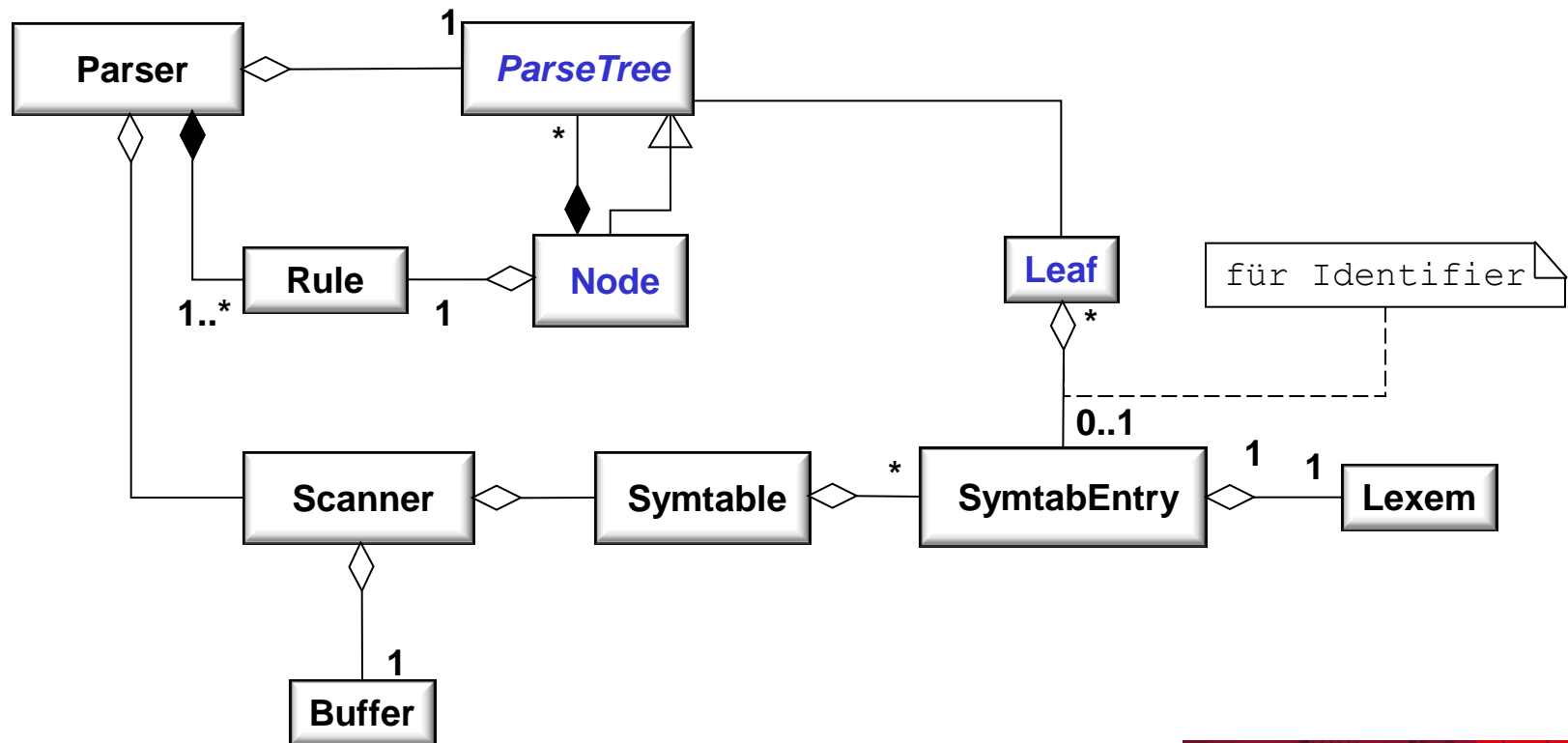


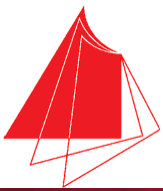
Aufgaben

c) Erstellen Sie einen Strukturbaum (Parse-Baum).

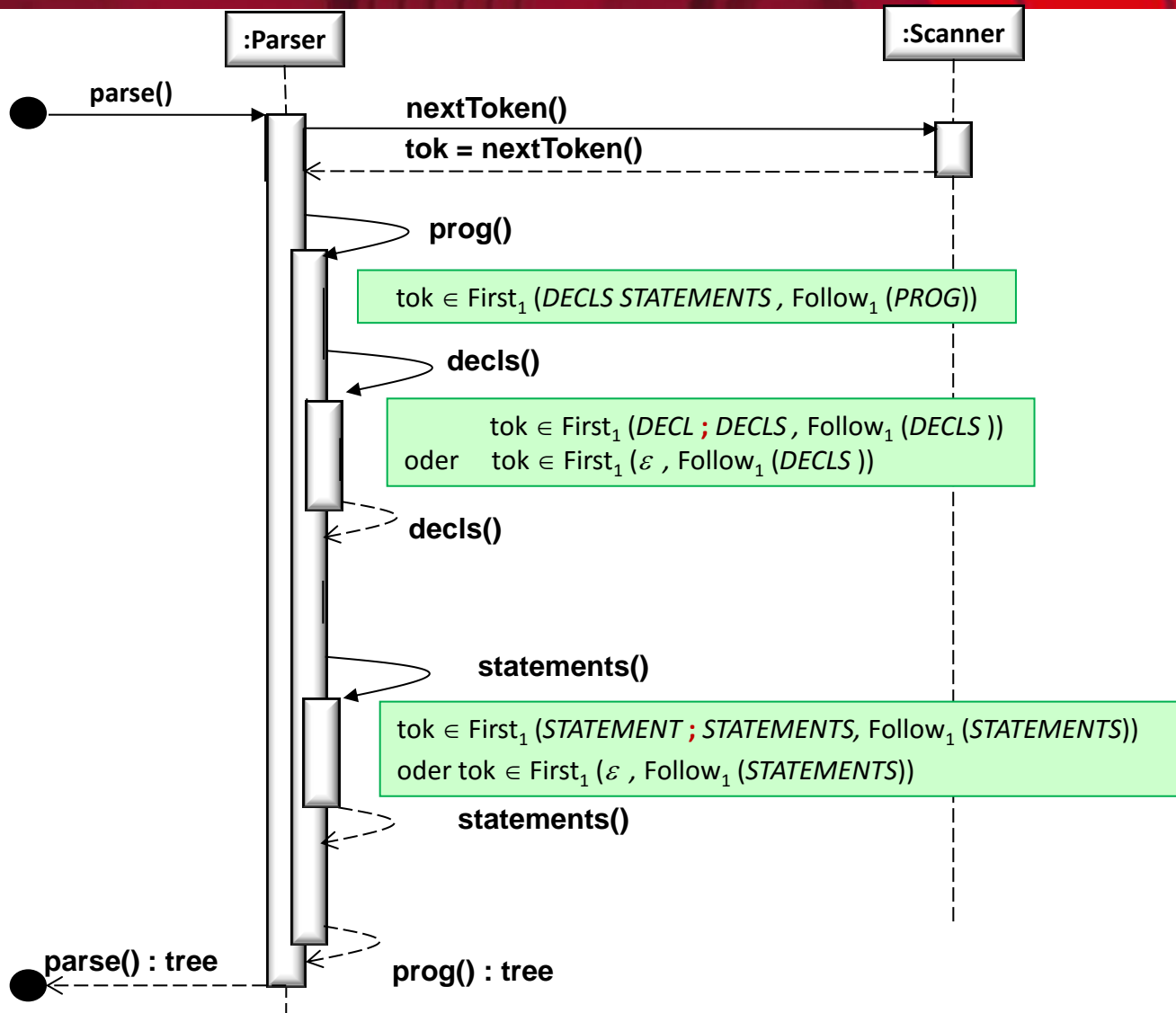
Erweitern Sie hierzu die Funktionen des Parsers, so dass sie nicht nur die Syntax überprüfen, sondern auch den Baum aufbauen.

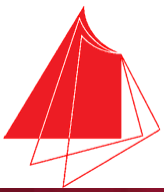
(Bem.: Für jede erkannte Regel entsteht ein neuer Teilbaum)



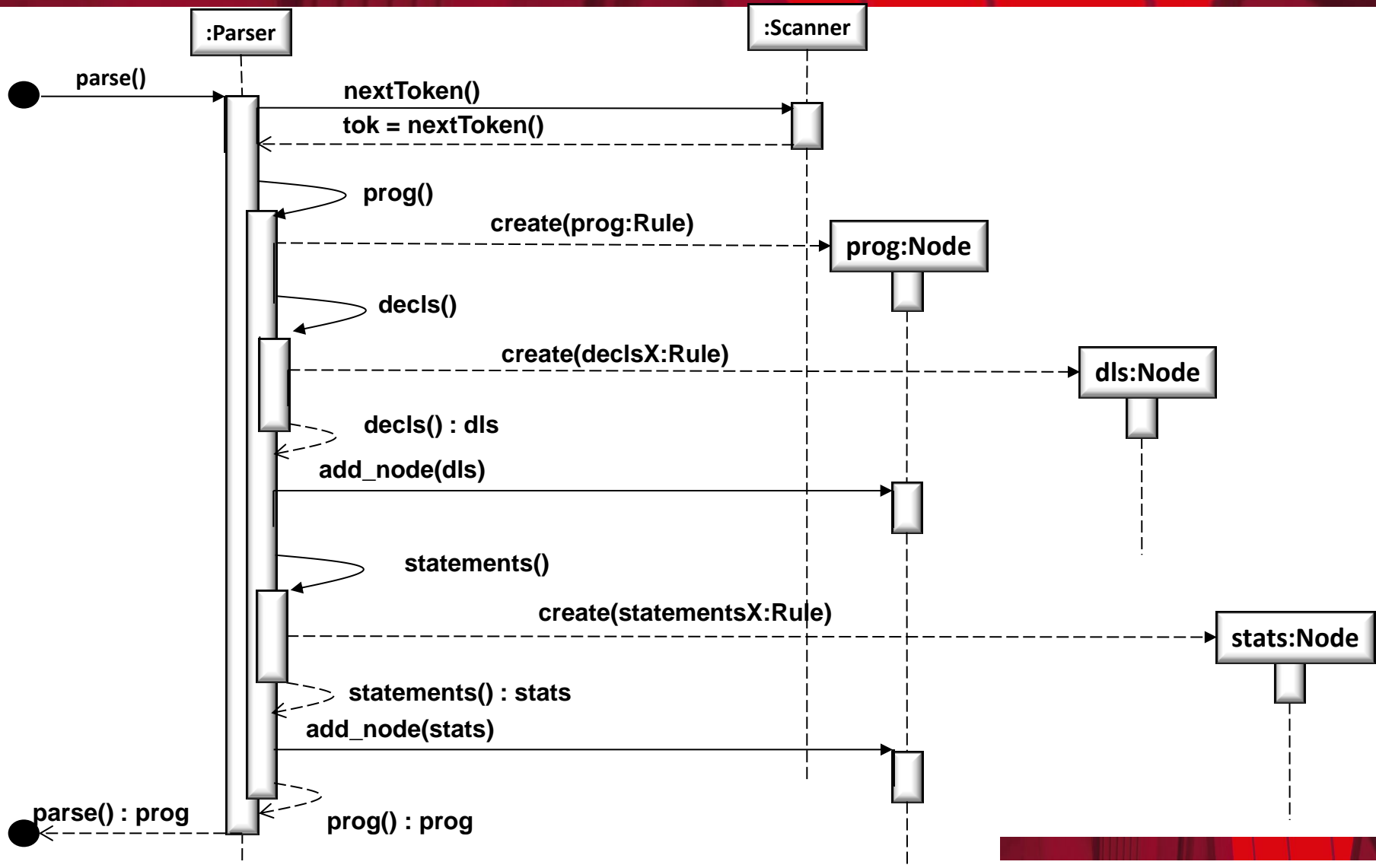


Ein Szenario





Ein Szenario





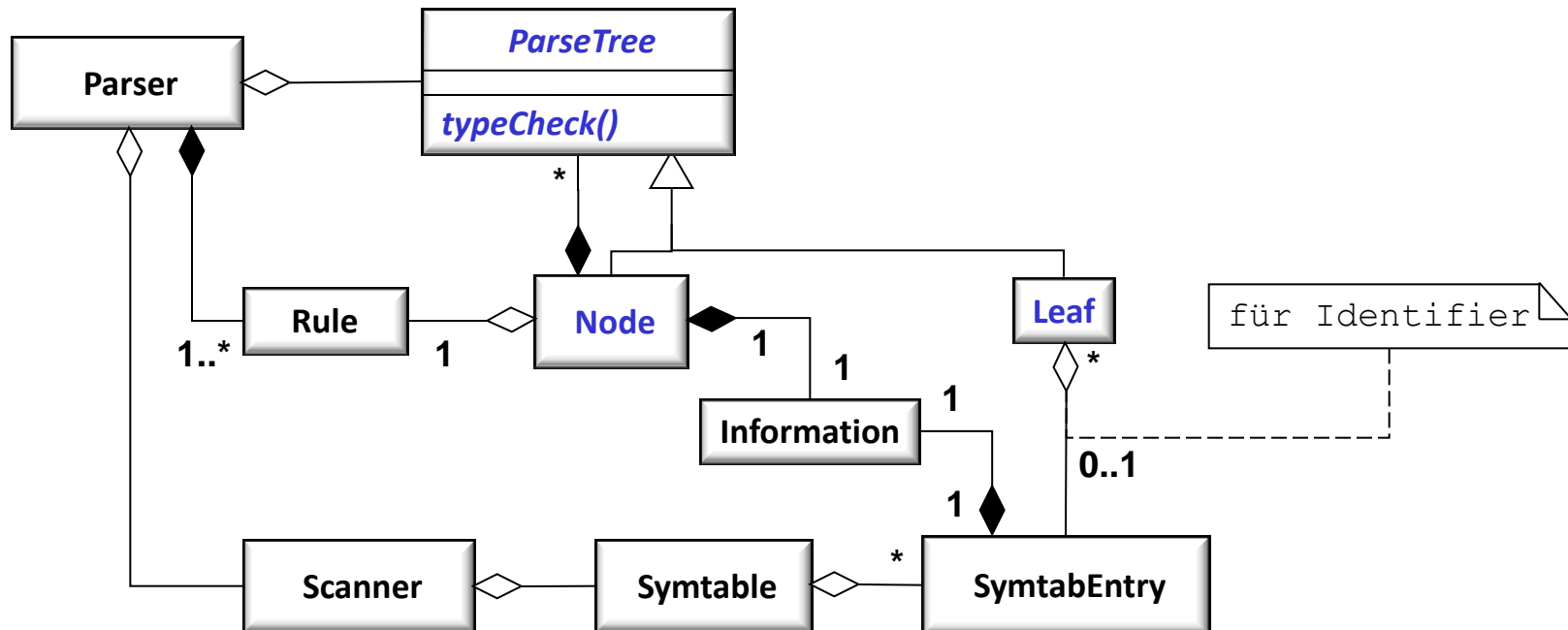
Aufgaben

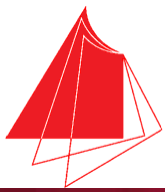
d) Evaluieren Sie den Parse-Baum

Ermitteln Sie hierzu zu jedem Knoten den entsprechenden Typ (gemäß Vorlage) und prüfen Sie, ob die Typen der Unterbäume zusammenpassen.

Speichern Sie die Typ-Information im Knoten und für **Identifizier als Information in der Symboltabelle**.

Hinweis: Erweitern Sie hierzu die Klasse *ParseTree* um eine Operation **typeCheck**.





Typisierung und Typ-Check

```
typeCheck (PROG ::= DECLS STATEMENTS){  
  typeCheck(DECLS); typeCheck(STATEMENTS);  
  this.type = noType;}
```

Typ-Informationen:

intType , intArrayType, arrayType,
noType, errorType,
opPlus, opMinus, opMult, opDiv, opLess,
opGreater, opEqual, opUnequal, opAnd

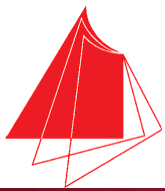
```
typeCheck (DECLS ::= DECL ; DECLS ){ typeCheck(DECL ); typeCheck(DECLS);  this.type = noType;}
```

```
typeCheck (DECLS ::= ε){this.type = noType;}
```

```
typeCheck(DECL::= int ARRAY identifier){typeCheck(ARRAY);  
  if (getType(identifier)!=noType ) { error(„identifier already defined“);this.type=errorType;}  
  else if (ARRAY.type==errorType){ this.type = errorType;}  
  else { this.type = noType;  
    if (ARRAY.type == arrayType) store(identifier, intArrayType); // Typ-Information speichern  
    else store(identifier, intType);} }// Typ-Information speichern
```

```
typeCheck(ARRAY::=[integer]){  
  if(integer.value>0) this.type= arrayType ;  
  else {error(„no valid dimension“); this.type= errorType;}}
```

```
typeCheck(ARRAY ::= ε){ this.type = noType ;}
```

Typisierung und Typ-Check

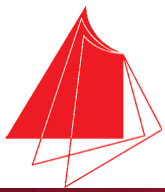
```
typeCheck (STATEMENTS ::= STATEMENT ; STATEMENTS){
    typeCheck(STATEMENT ); typeCheck(STATEMENTS); this.type = noType;}

typeCheck (STATEMENTS ::= ε){this.type = noType;}

typeCheck (STATEMENT ::= identifier INDEX := EXP ){ typeCheck(EXP); typeCheck(INDEX);
    if (getType(identifier) == noType) {error(„identifier not defined“); this.type = errorType; }
    else if ( EXP.type == intType && (
        ( getType(identifier) == intType && INDEX.type == noType)
        || ( getType(identifier) == intArrayType && INDEX.type == arrayType)) )
        this.type = noType;
    else { error(„incompatible types“); this.type = errorType; }}

typeCheck (STATEMENT ::= write( EXP ) ){ typeCheck(EXP); this.type = noType; }

typeCheck (STATEMENT ::= read( identifier INDEX ) ){typeCheck(INDEX);
    if (getType(identifier) == noType){error(„identifier not defined“); this.type = errorType; }
    else if ( ( (getType(identifier) == intType ) && INDEX.type == noType)
        || ( (getType(identifier) == intArrayType) &&INDEX.type==arrayType))
        this.type = noType;
    else { error(„incompatible types“); this.type = errorType; }}
```



Typisierung und Typ-Check

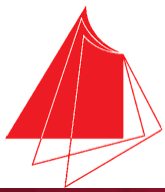
```
typeCheck (STATEMENT ::= { STATEMENTS } ){ typeCheck(STATEMENTS); this.type = noType; }
```

```
typeCheck (STATEMENT ::= if ( EXP ) STATEMENT else STATEMENT ){  
    typeCheck(EXP); typeCheck(STATEMENT ); typeCheck(STATEMENT );  
    if (EXP.type == errorType) this.type = errorType;  
    else this.type = noType; }
```

```
typeCheck (STATEMENT ::= while ( EXP ) STATEMENT){  
    typeCheck(EXP); typeCheck(STATEMENT );  
    if (EXP.type == errorType) this.type = errorType;  
    else this.type = noType; }
```

```
typeCheck(INDEX ::= [ EXP ] ) {  
    typeCheck(EXP);  
    if (EXP.type == errorType) this.type = errorType;  
    else this.type = arrayType; }
```

```
typeCheck(INDEX ::= ε) {this.type = noType ;}
```



Typisierung und Typ-Check

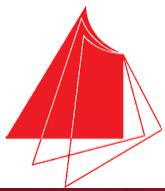
```
typeCheck (EXP ::= EXP2 OP_EXP ){
  typeCheck(EXP2); typeCheck(OP_EXP);
  if (OP_EXP.type == noType ) this.type = EXP2.type ;
  else if (EXP2.type != OP_EXP.type) this.type = errorType;
  else this.type = EXP2.type; }

typeCheck (EXP2 ::= ( EXP )){ typeCheck(EXP); this.type = EXP.type ; }

typeCheck (EXP2 ::= identifier INDEX ){
  typeCheck(INDEX);
  if (identifier.type == noType ){error(„identifier not defined“); this.type = errorType; }
  else if ((getType(identifier) == intType && INDEX.type == noType)
    this.type = getType(identifier);
  else if ( getType(identifier) == intArrayType && INDEX.type == arrayType) this.type = intType;
  else { error(„no primitive Type“); this.type = errorType; }}

typeCheck (EXP2 ::= integer ){ this.type = intType ; }

typeCheck (EXP2 ::= - EXP2){ typeCheck(EXP2); this.type = EXP2.type ; }
```



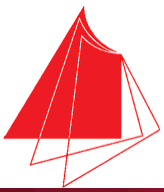
Typisierung und Typ-Check

```
typeCheck (EXP2 ::= ! EXP2){  
  typeCheck(EXP2);  
  if (EXP2.type != intType){this.type = errorType; }  
  else this.type = intType; }
```

```
typeCheck (OP_EXP ::= OP EXP ){  
  typeCheck(OP); typeCheck(EXP); this.type = EXP.type ;}
```

```
typeCheck (OP_EXP ::=  $\varepsilon$ ){this.type = noType;} 
```

```
typeCheck (OP ::= +){ this.type = opPlus; }  
typeCheck (OP ::= -){ this.type = opMinus; }  
typeCheck (OP ::= *){ this.type = opMult; }  
typeCheck (OP ::= :){ this.type = opDiv; }  
typeCheck (OP ::= <){ this.type = opLess; }  
typeCheck (OP ::= >){ this.type = opGreater; }  
typeCheck (OP ::= =){ this.type = opEqual; }  
typeCheck (OP ::= <:>){ this.type = opUnequal; }  
typeCheck (OP ::= &){ this.type = opAnd; }
```

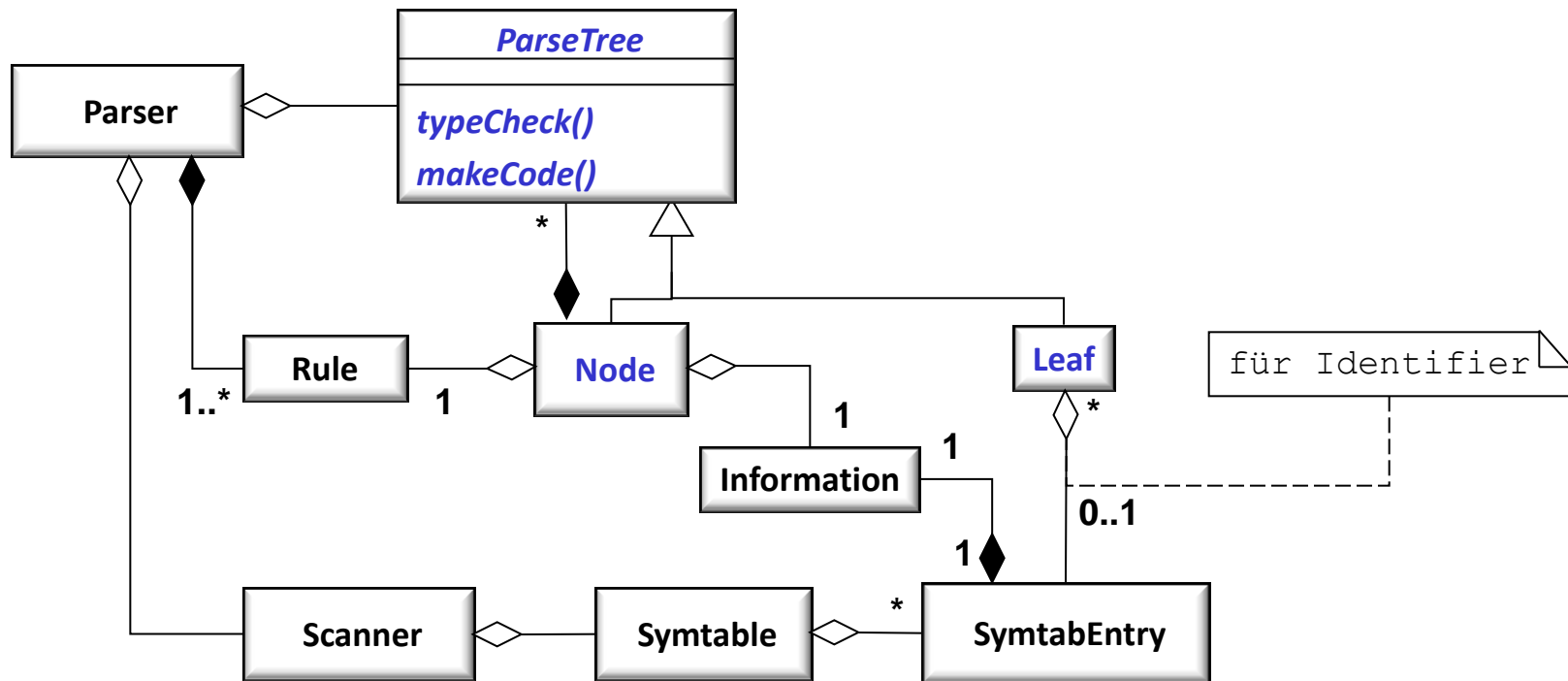


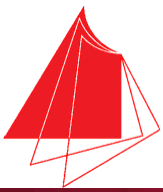
Aufgaben:

e) Erzeugen Sie Code

Bestimmen Sie hierzu zu jedem Knoten das entsprechende Code-Segment (gemäß Vorlage) und speichern Sie dieses in einer Code-Datei (xxx.code) ab.

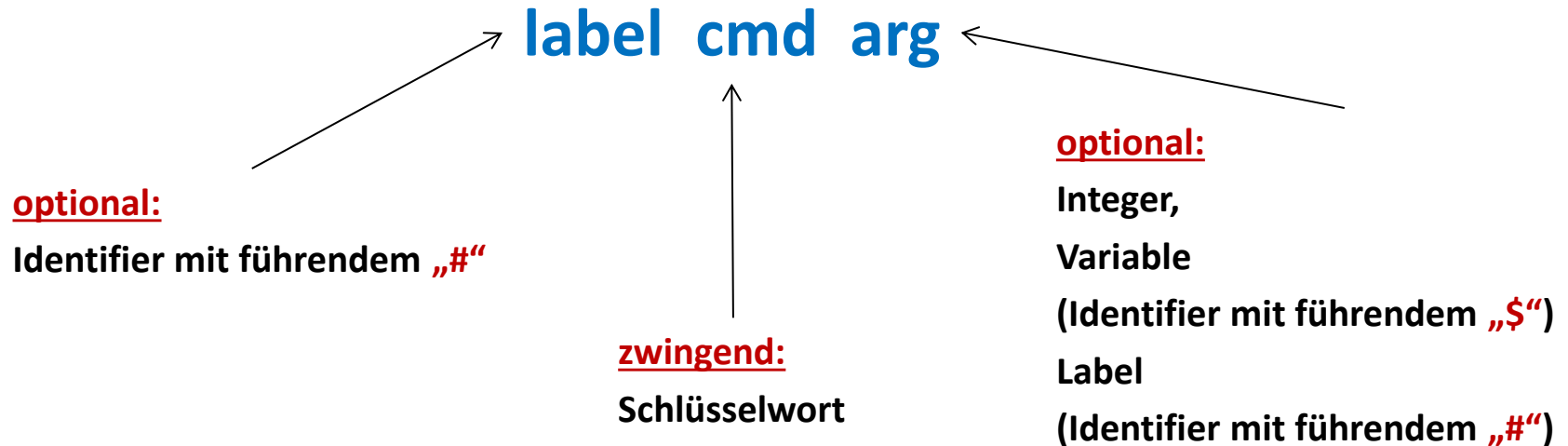
Hinweis: Erweitern Sie hierzu die Klasse *ParseTree* um eine Operation **makeCode**.



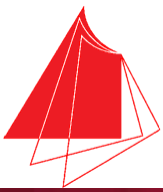


Eine einfache Stack-Maschine

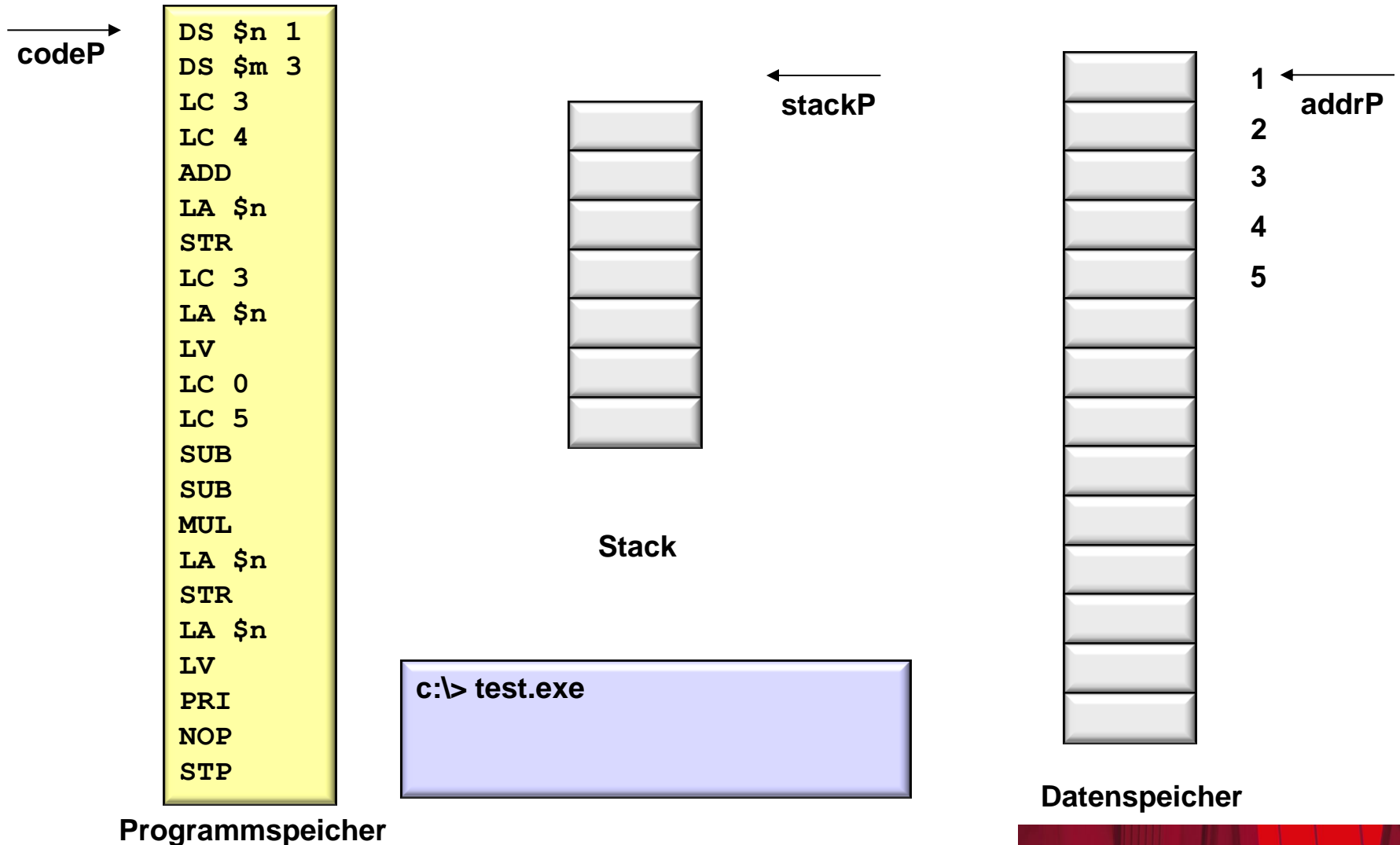
Kommandos mit Label und Argument

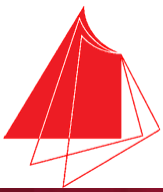


Ausnahme: Kommando zur Speicherreservierung
DS Variable Integer

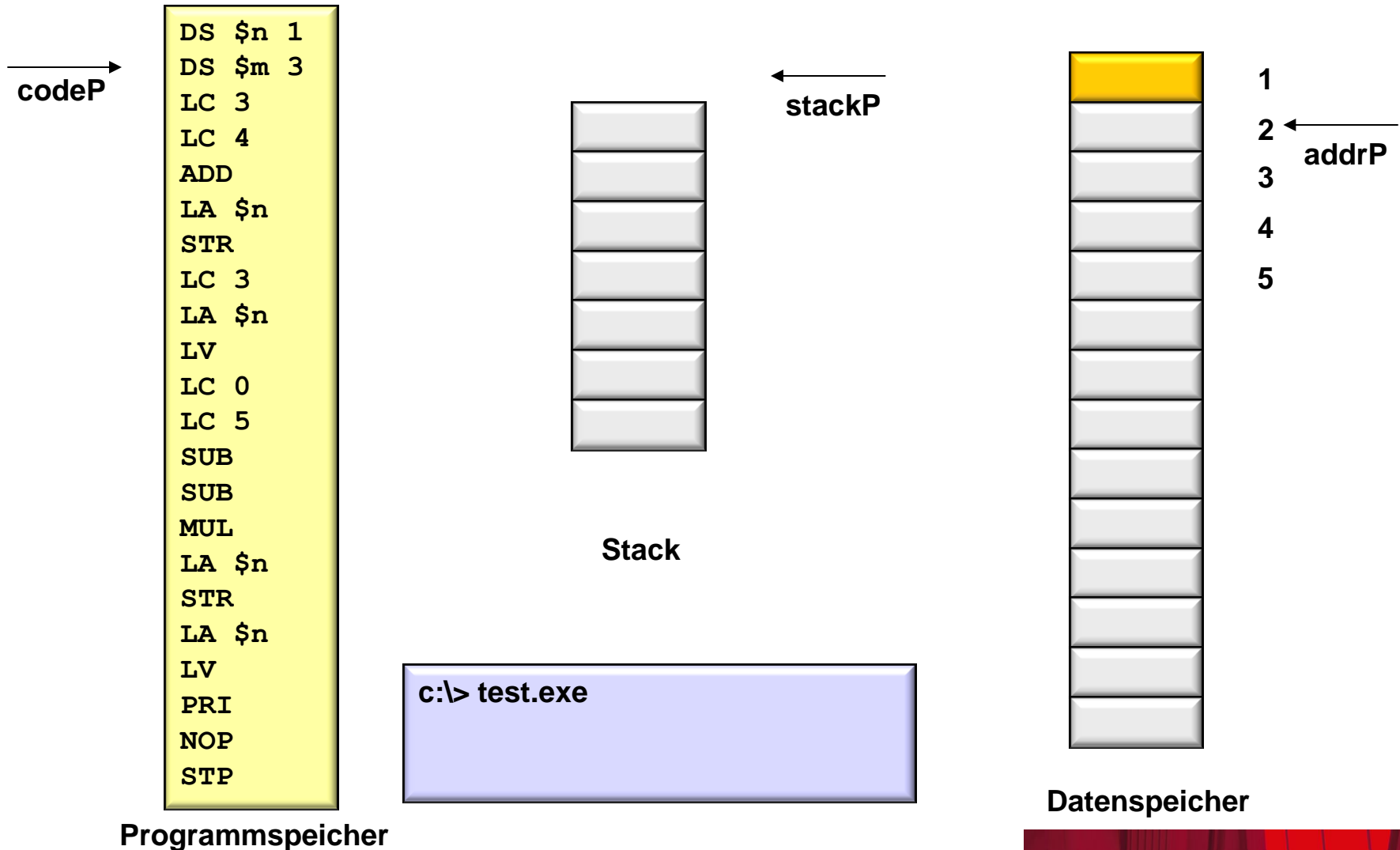


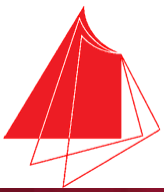
Eine einfache Stack-Maschine



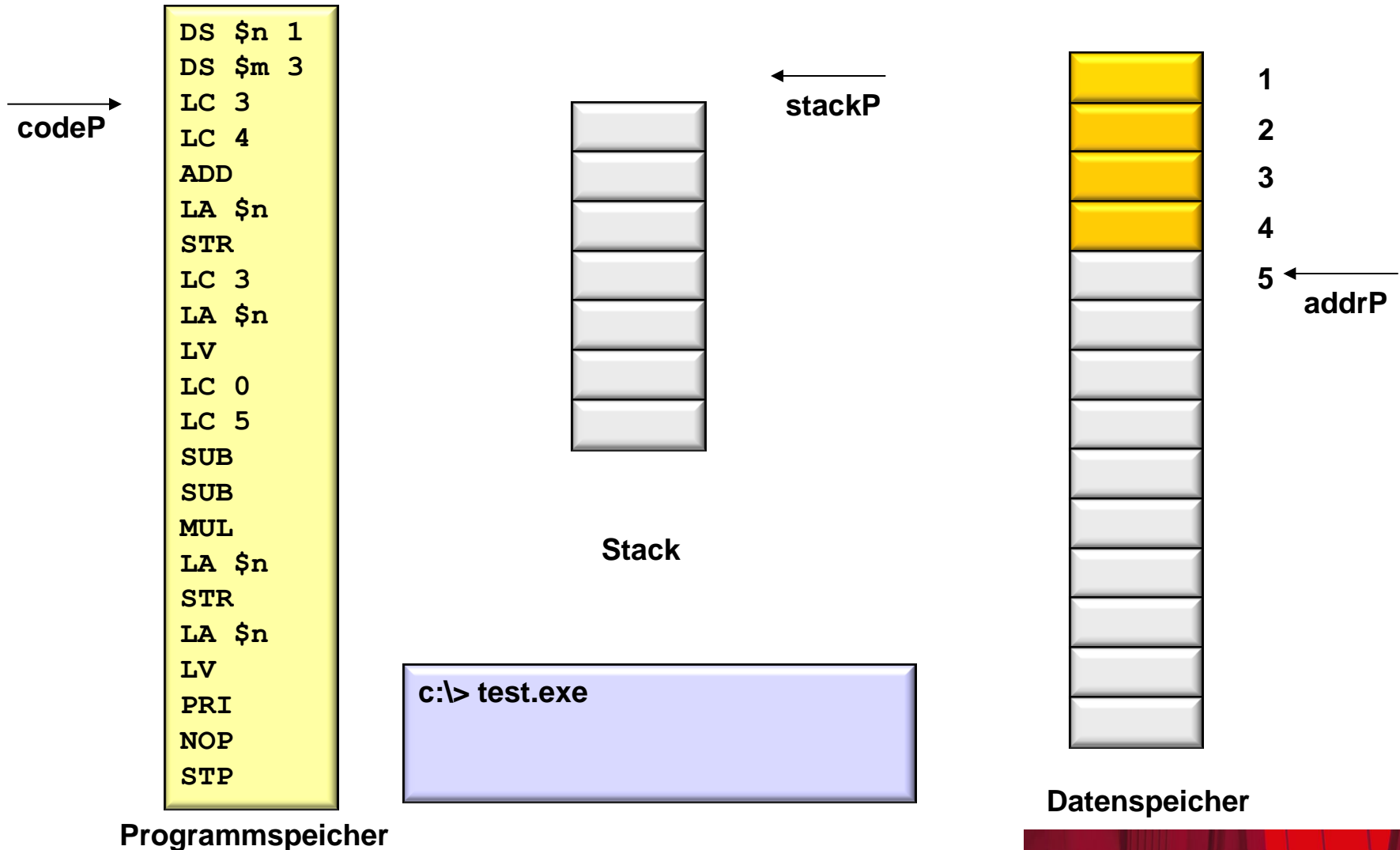


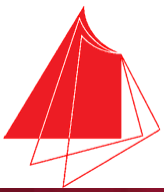
Eine einfache Stack-Maschine



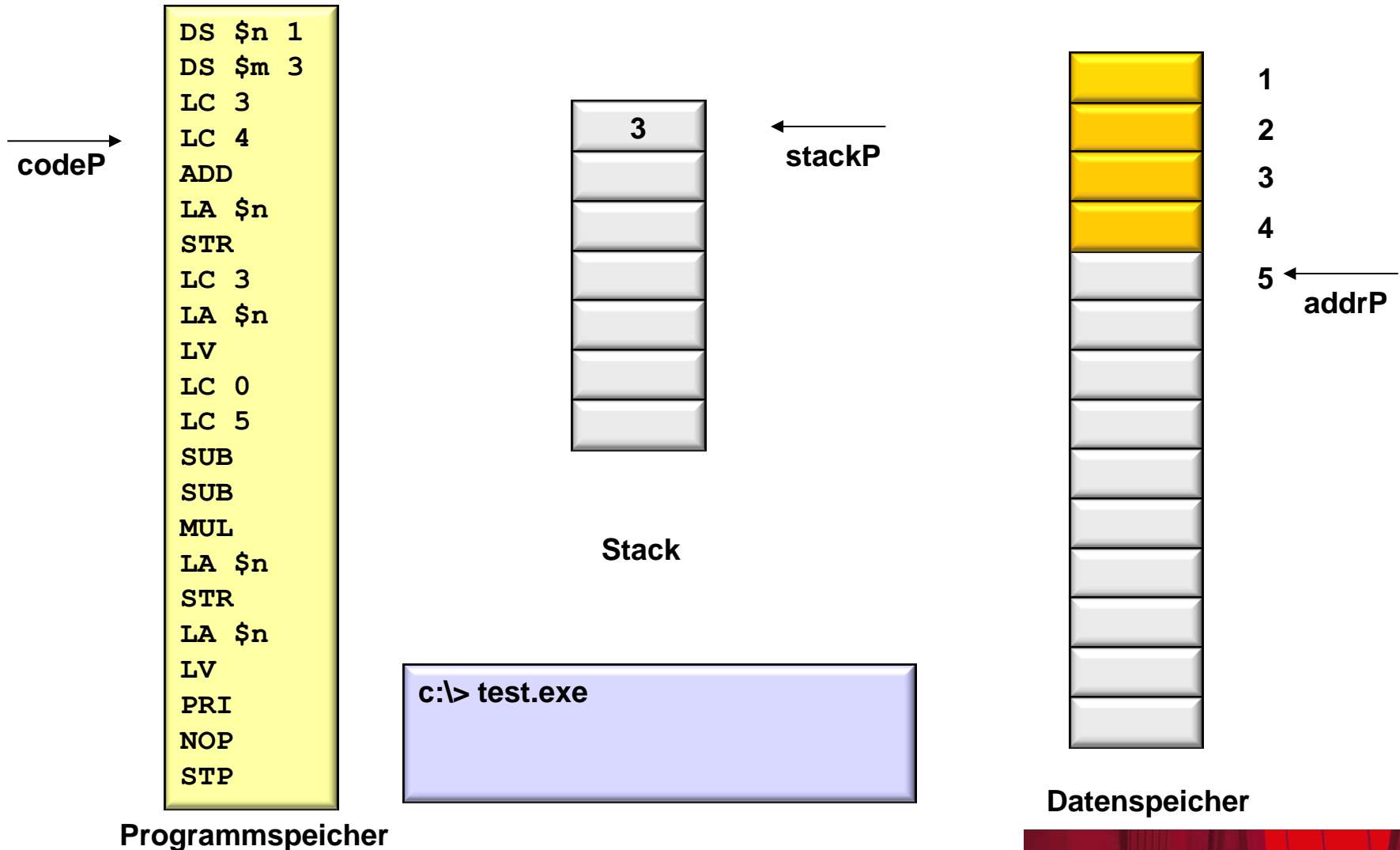


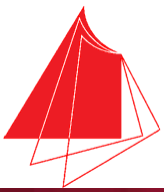
Eine einfache Stack-Maschine



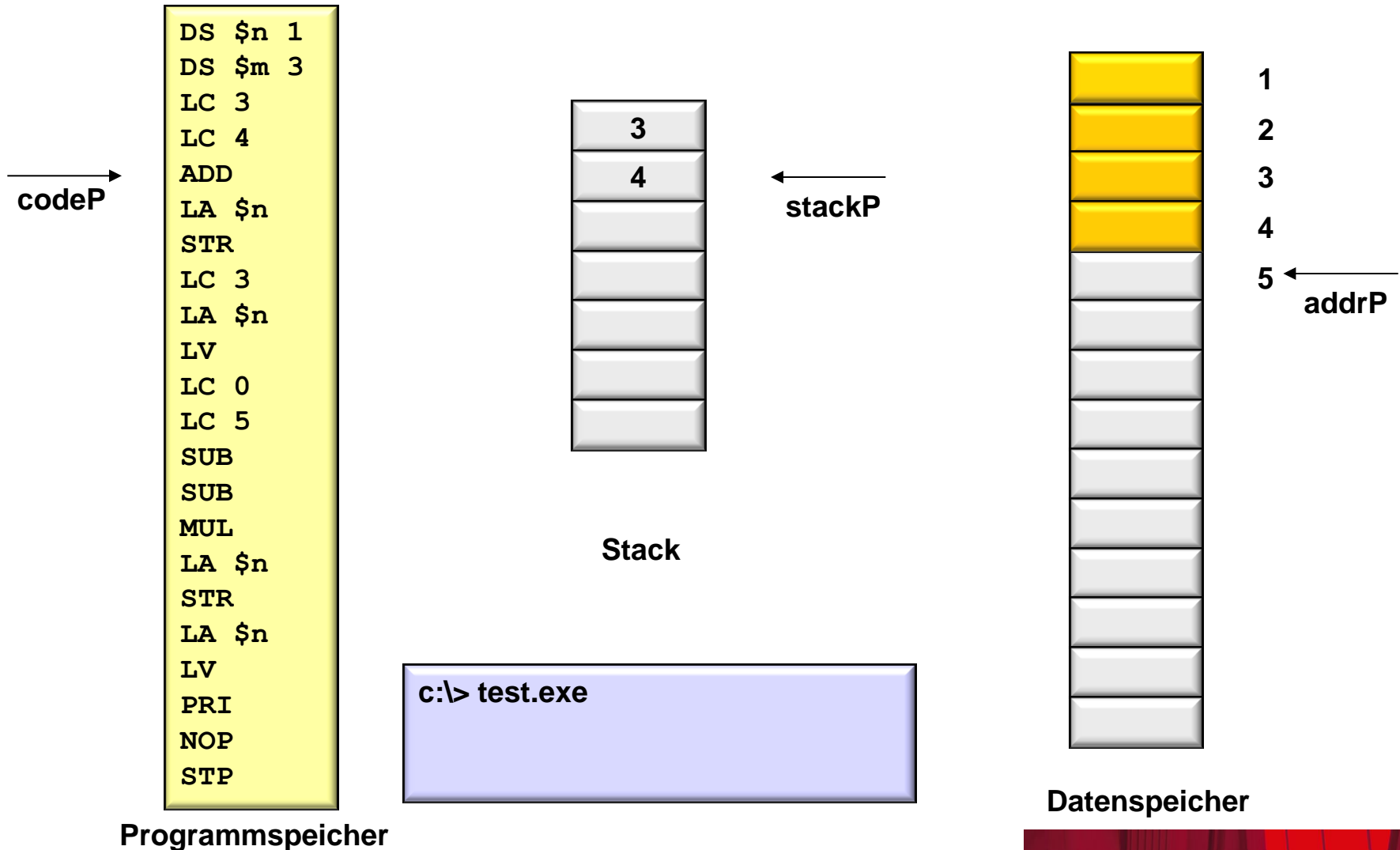


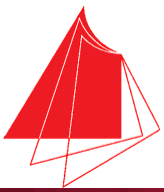
Eine einfache Stack-Maschine



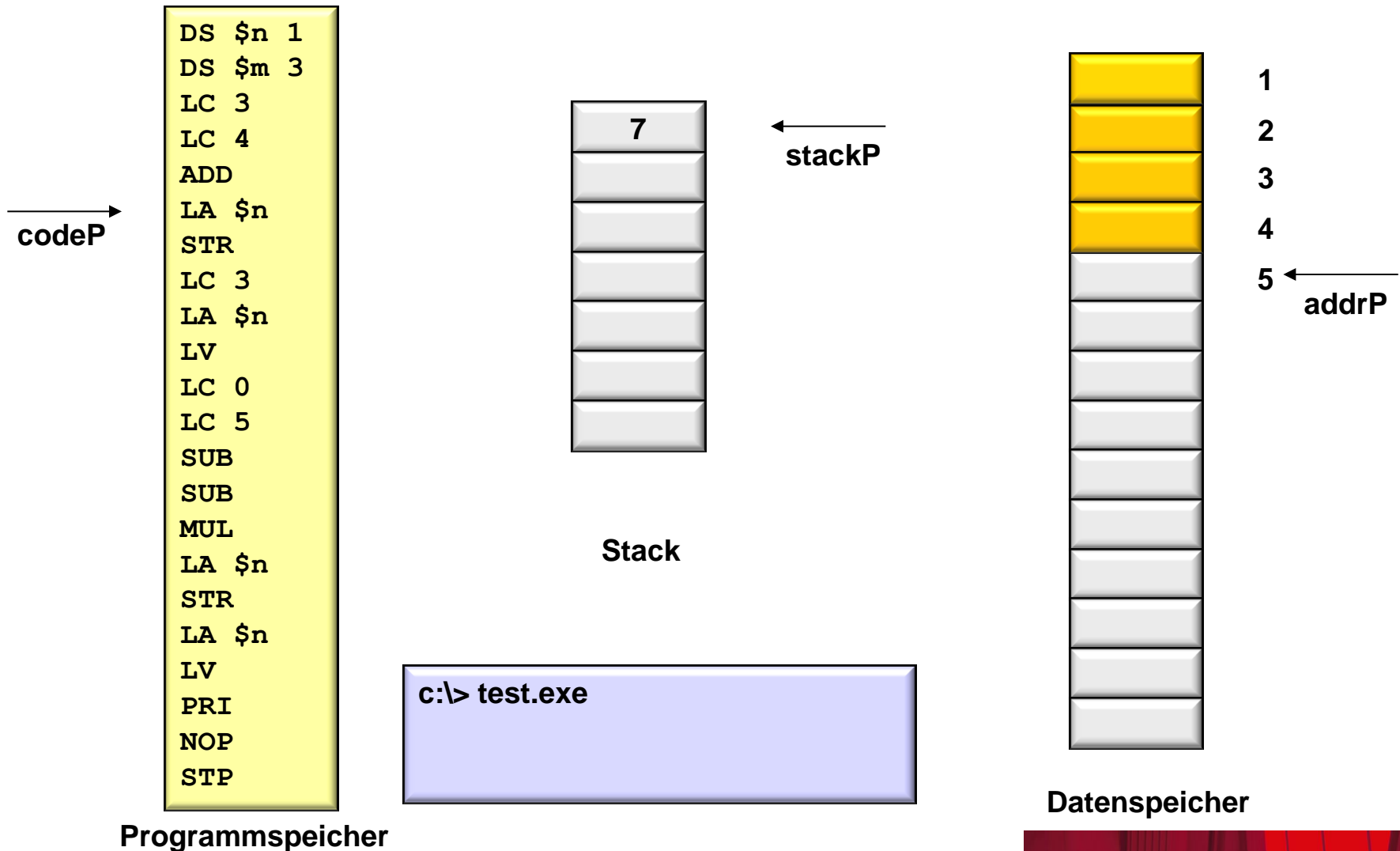


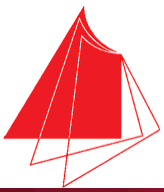
Eine einfache Stack-Maschine



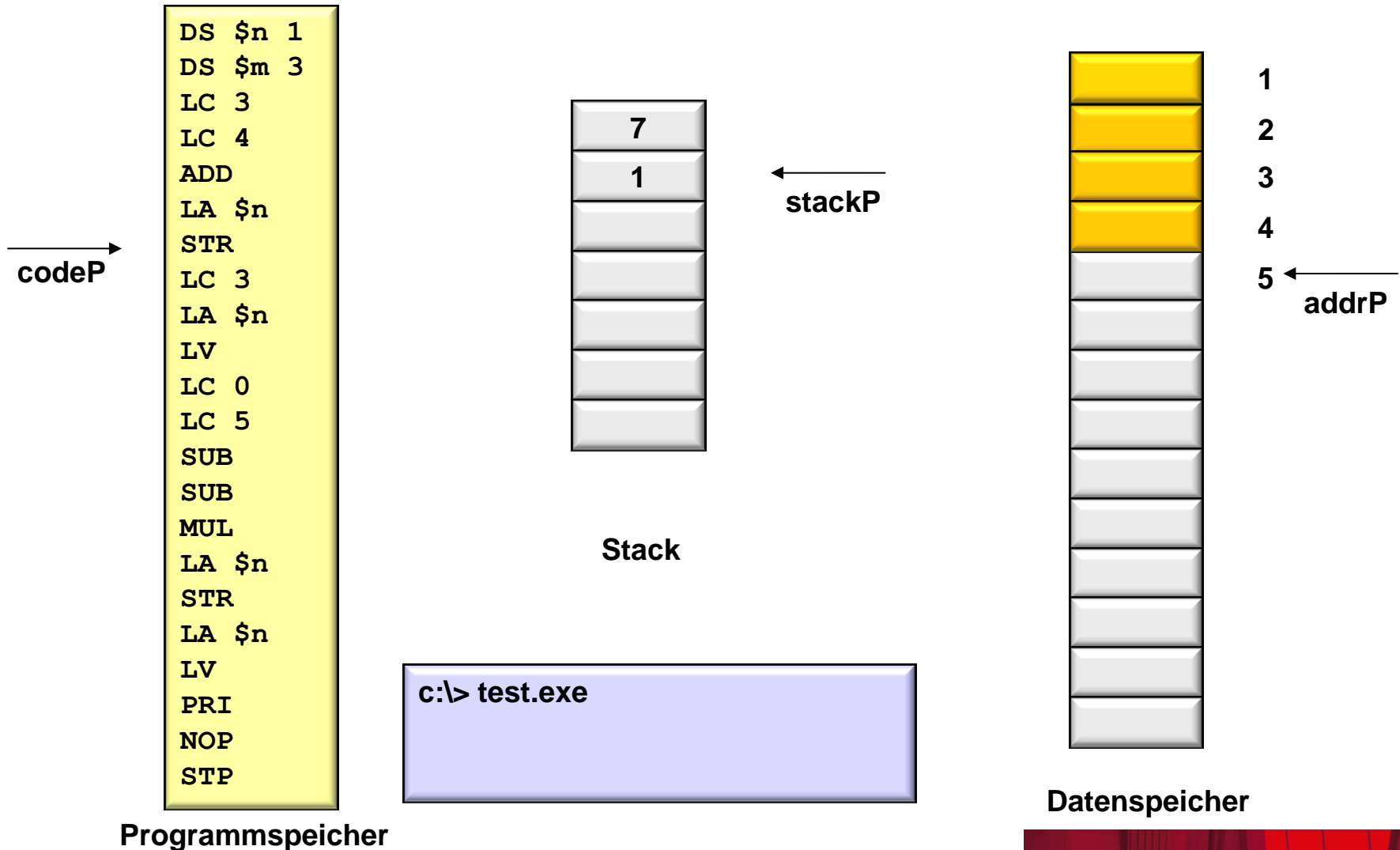


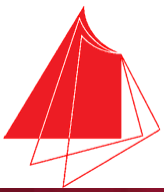
Eine einfache Stack-Maschine



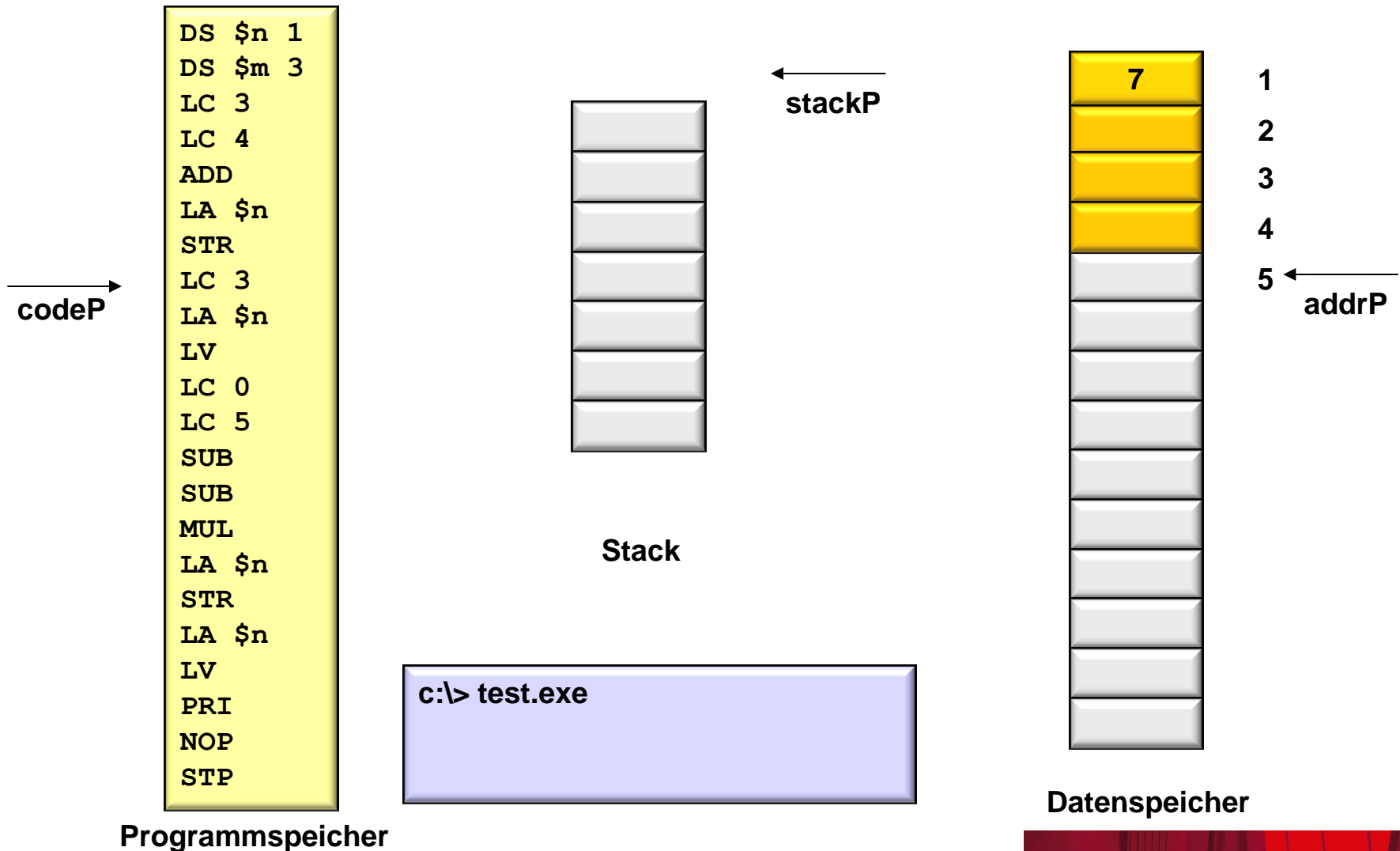


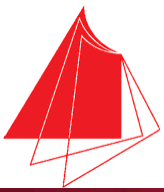
Eine einfache Stack-Maschine



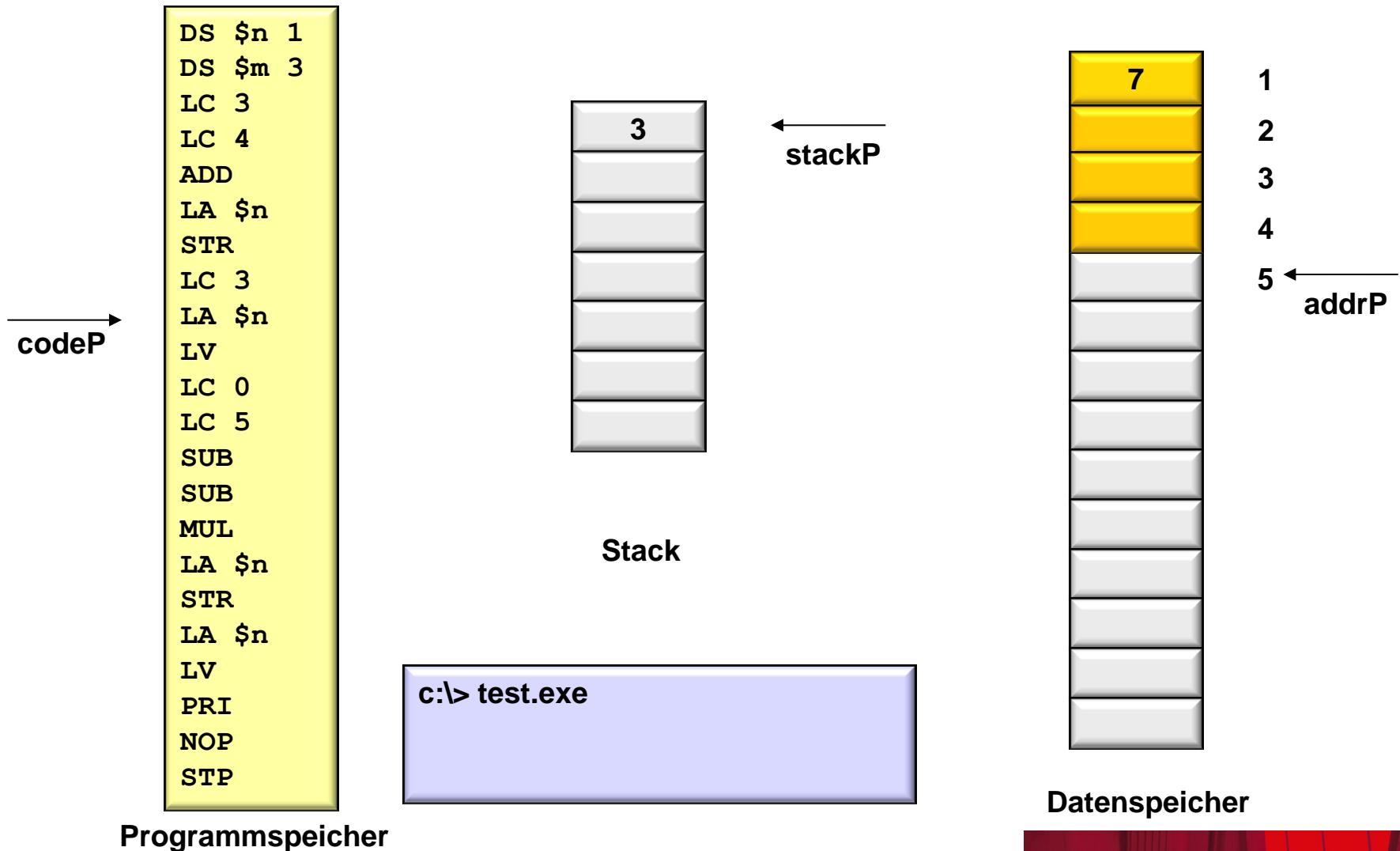


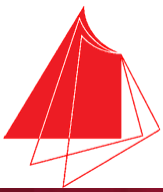
Eine einfache Stack-Maschine



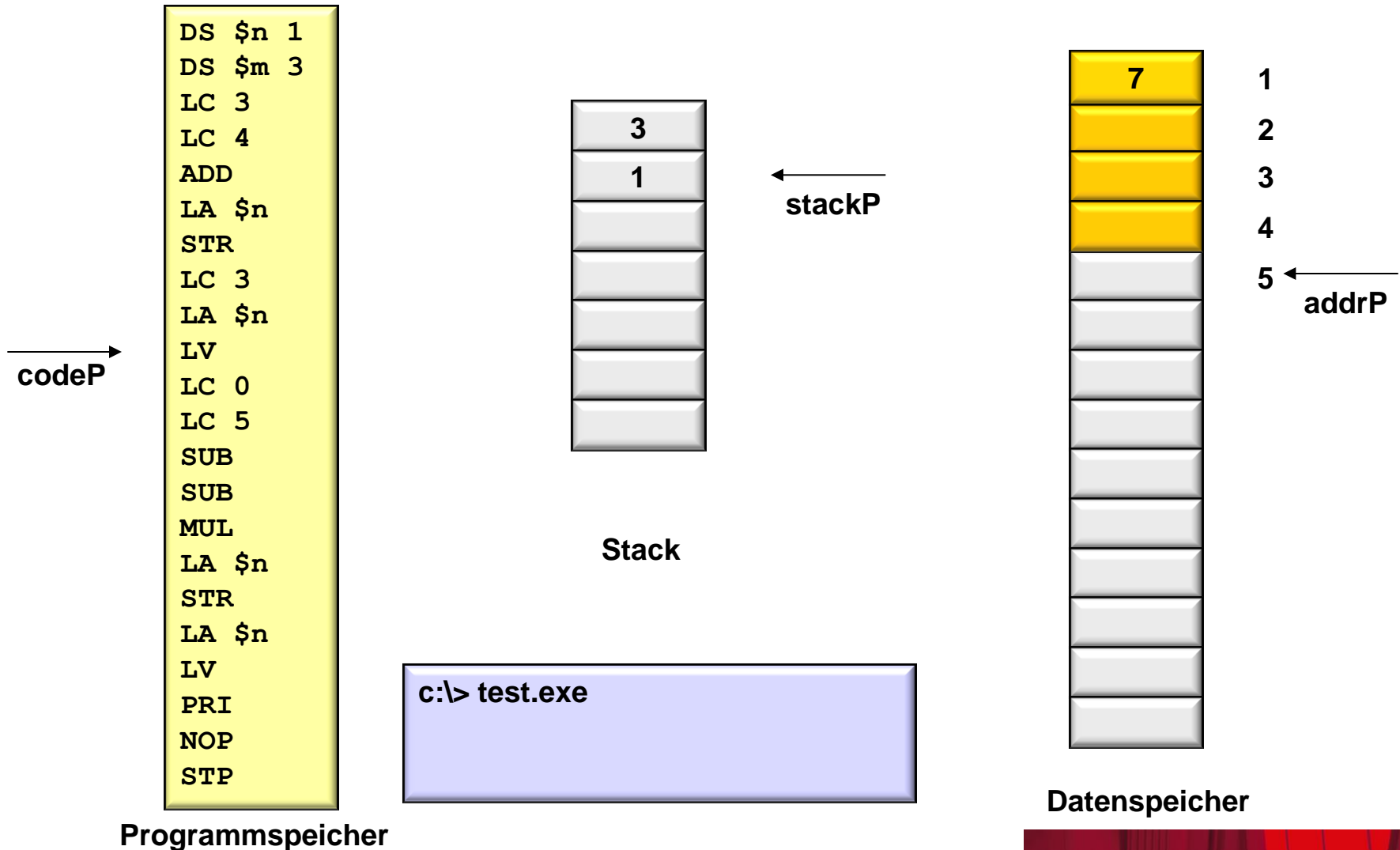


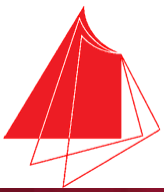
Eine einfache Stack-Maschine



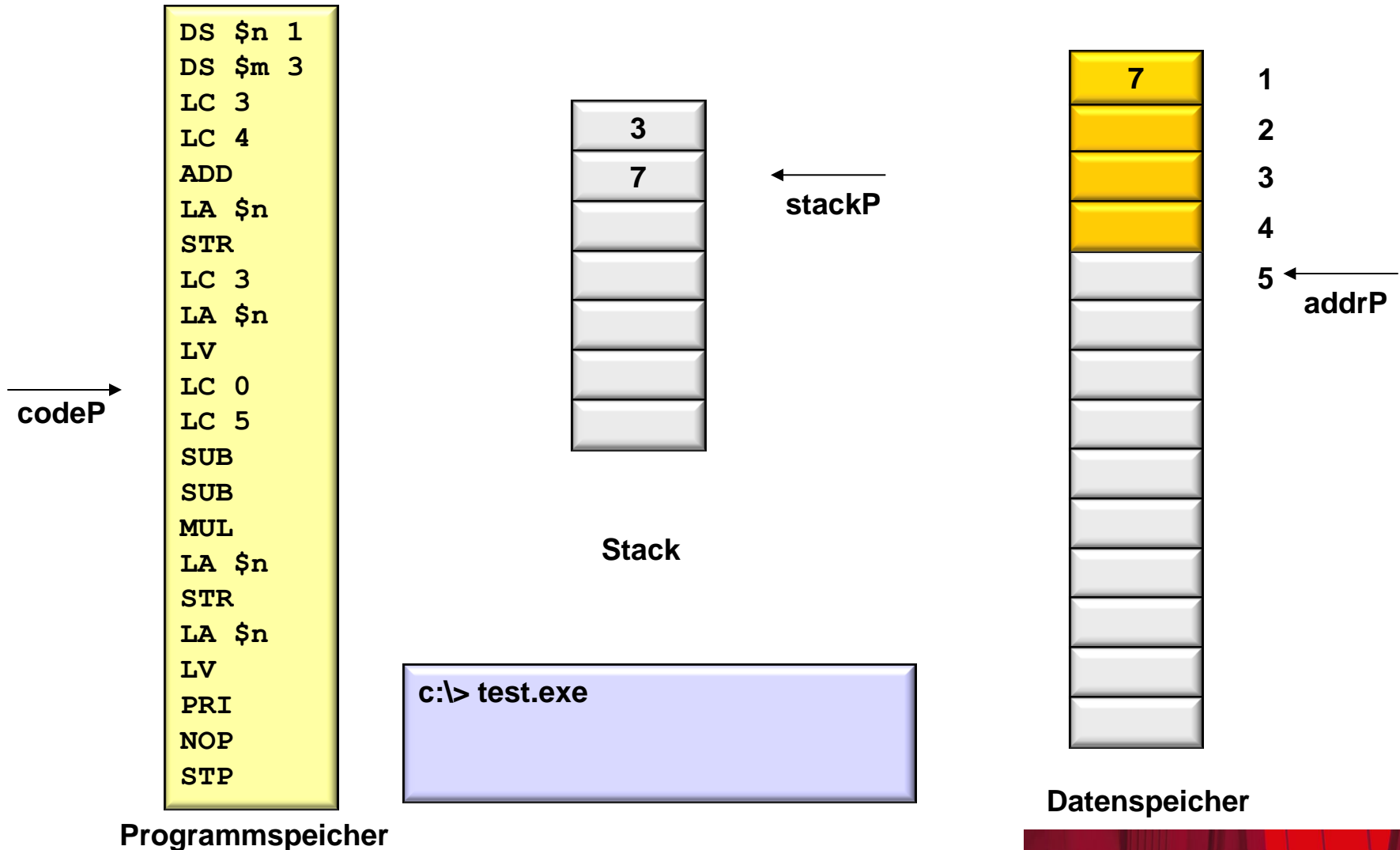


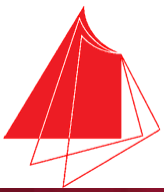
Eine einfache Stack-Maschine



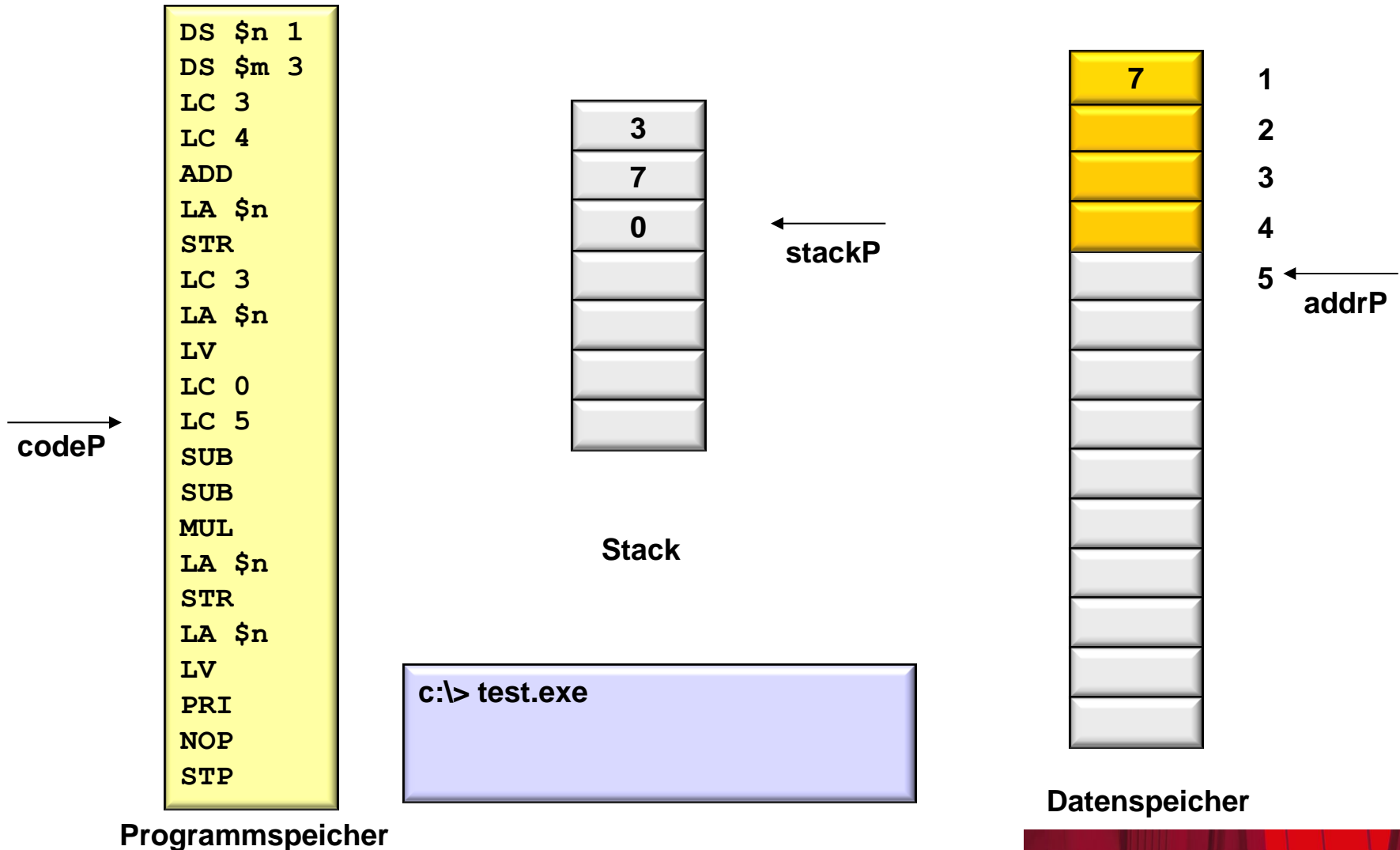


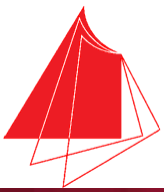
Eine einfache Stack-Maschine



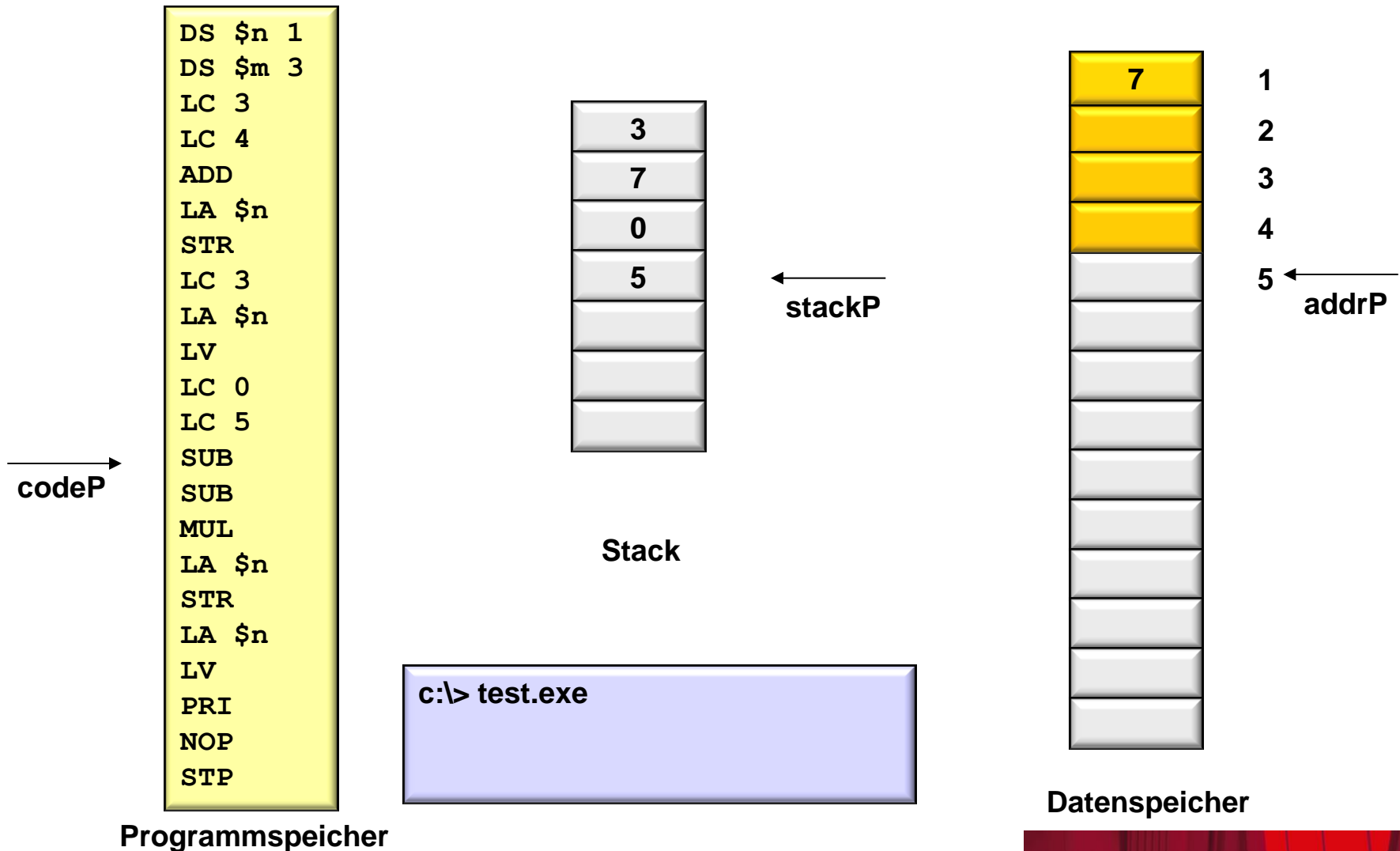


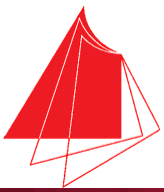
Eine einfache Stack-Maschine



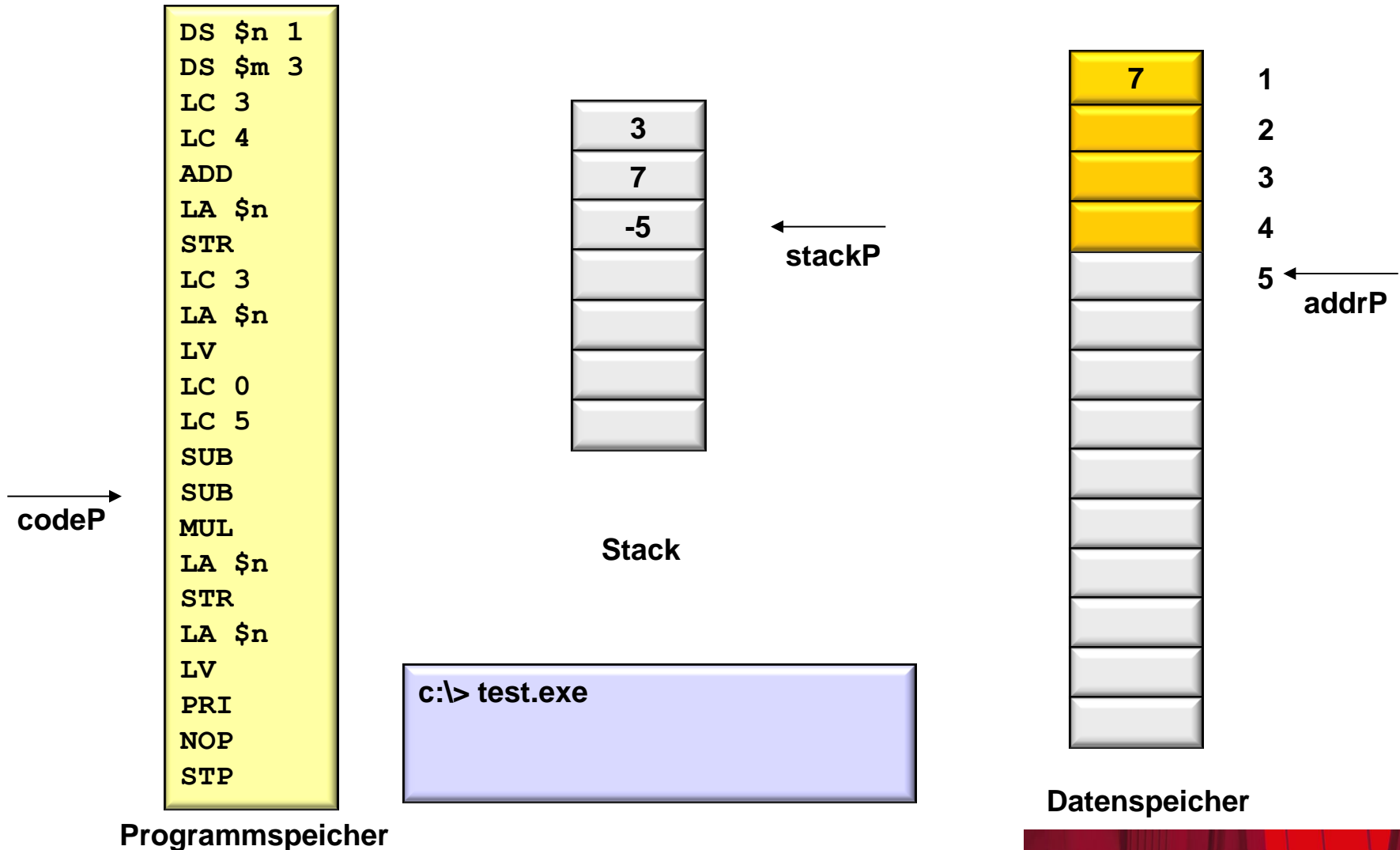


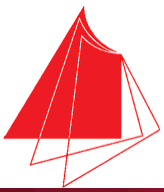
Eine einfache Stack-Maschine



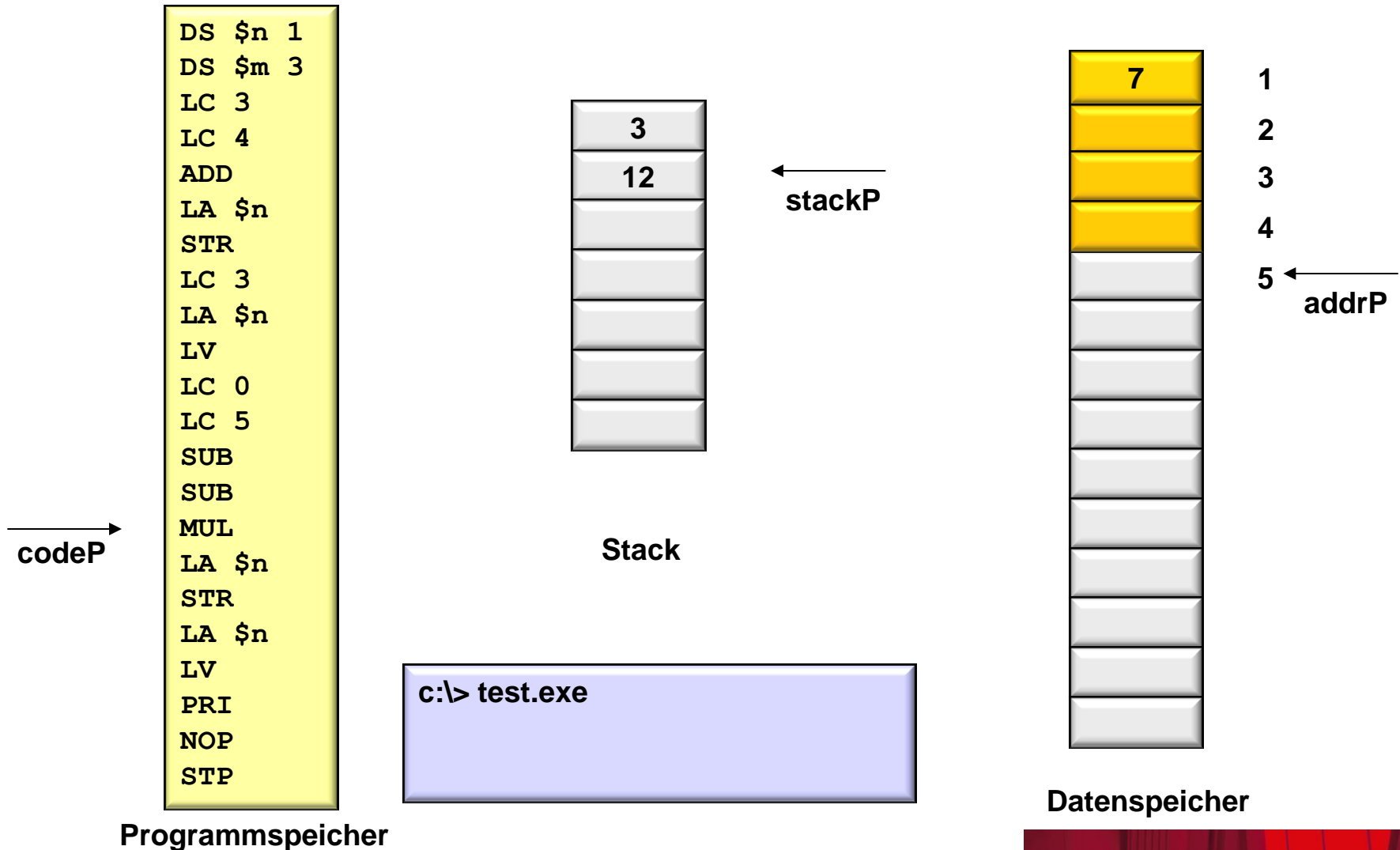


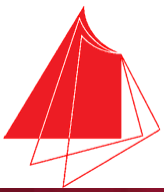
Eine einfache Stack-Maschine



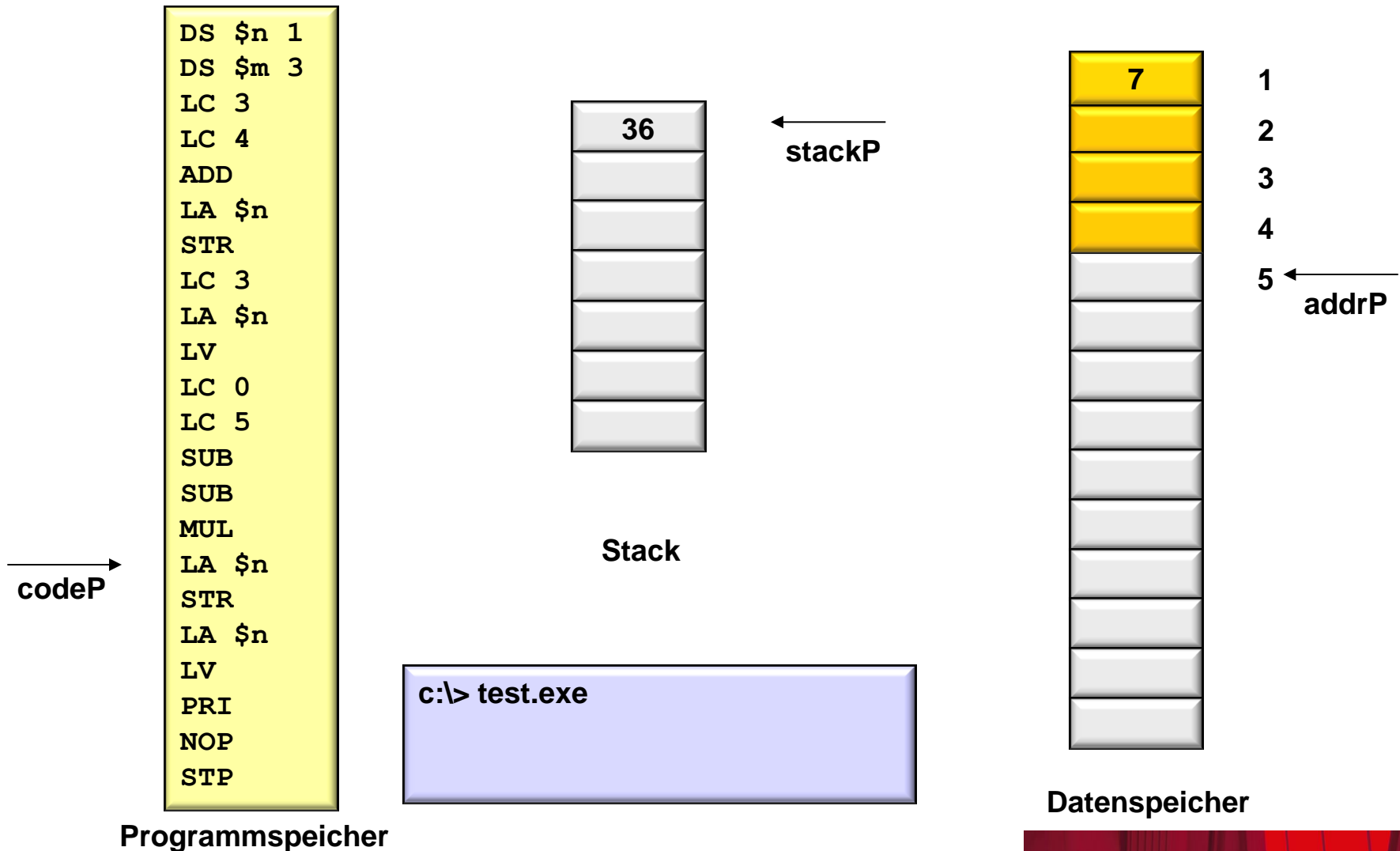


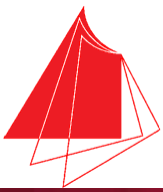
Eine einfache Stack-Maschine



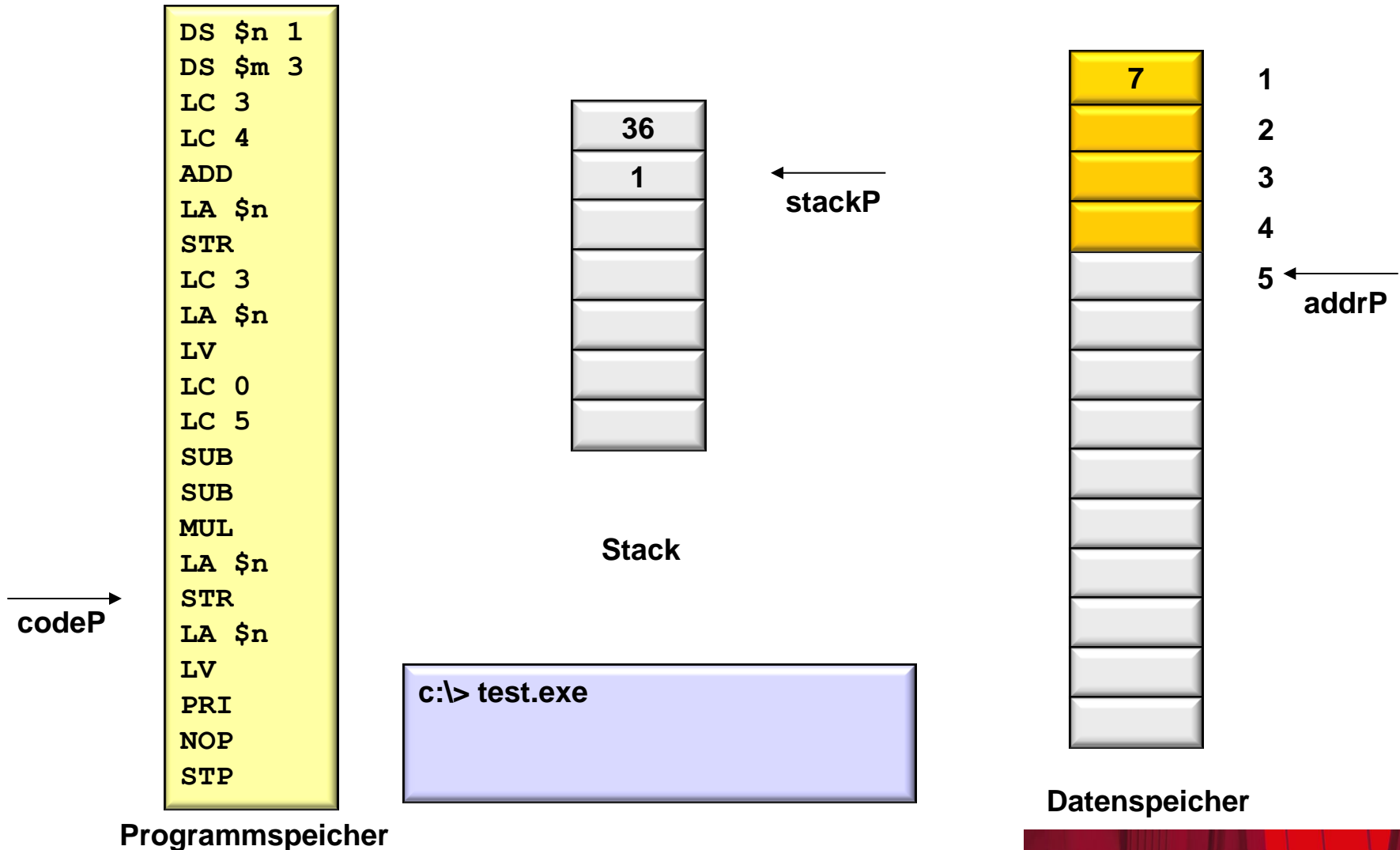


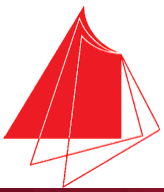
Eine einfache Stack-Maschine



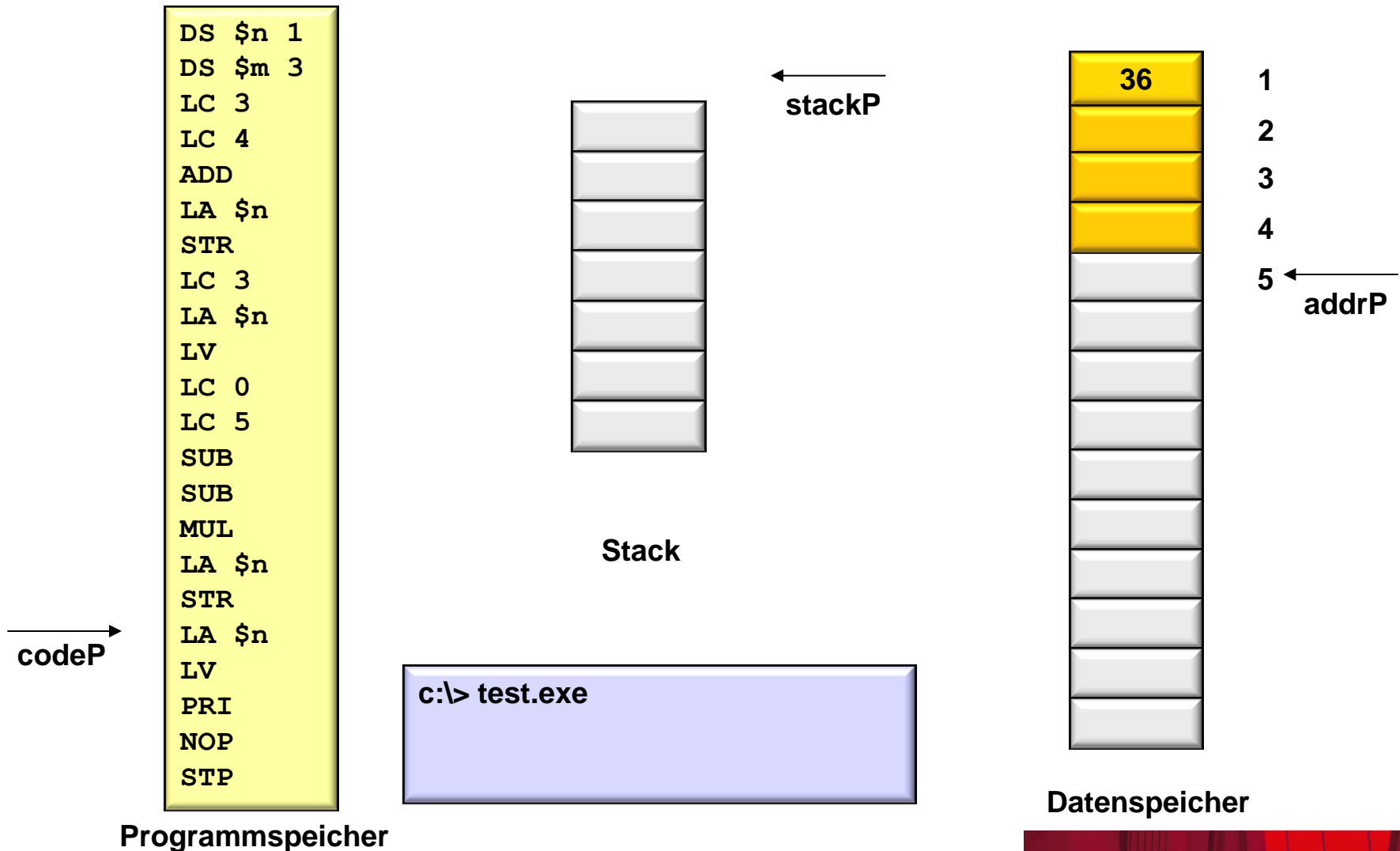


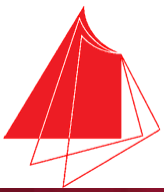
Eine einfache Stack-Maschine



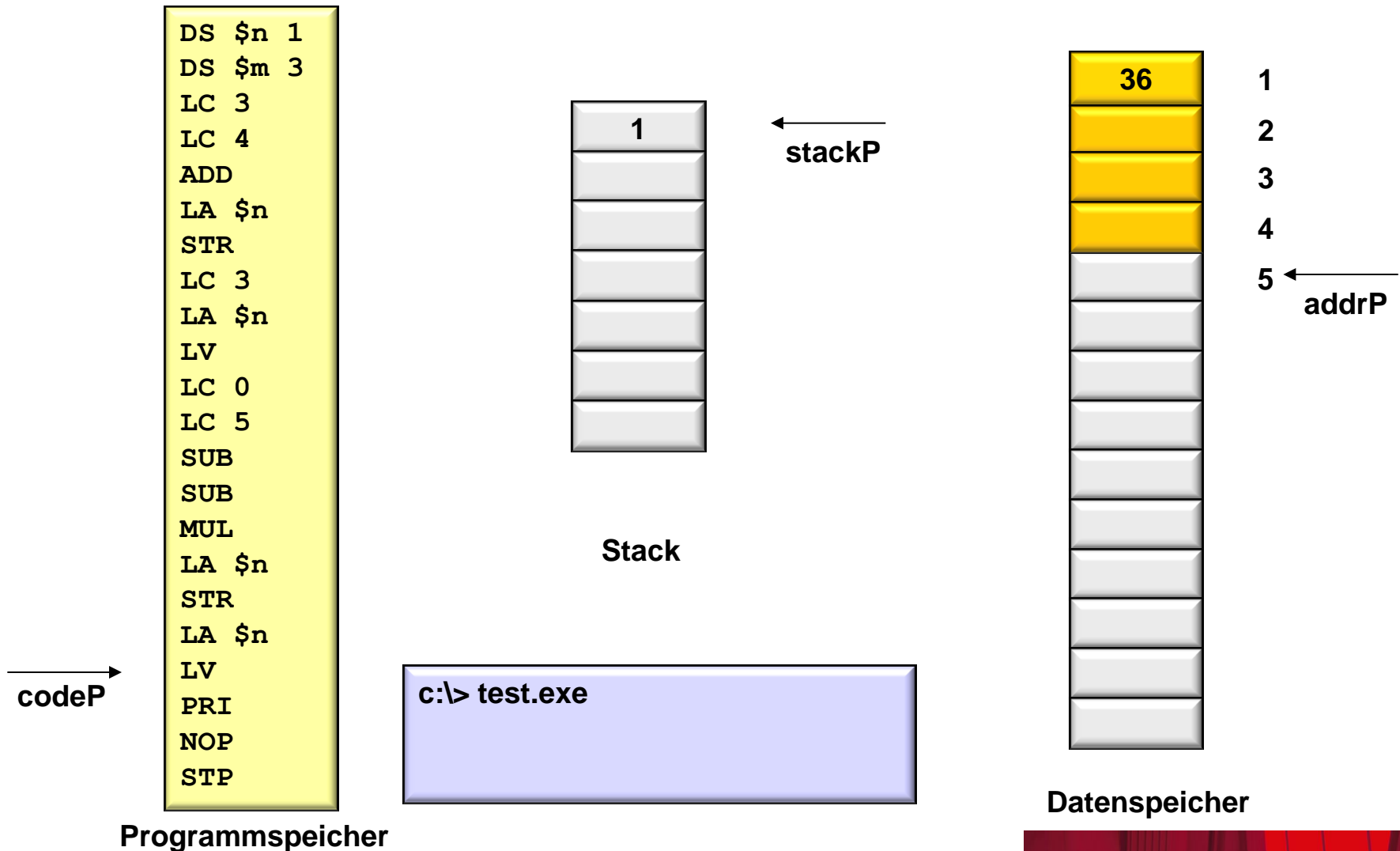


Eine einfache Stack-Maschine



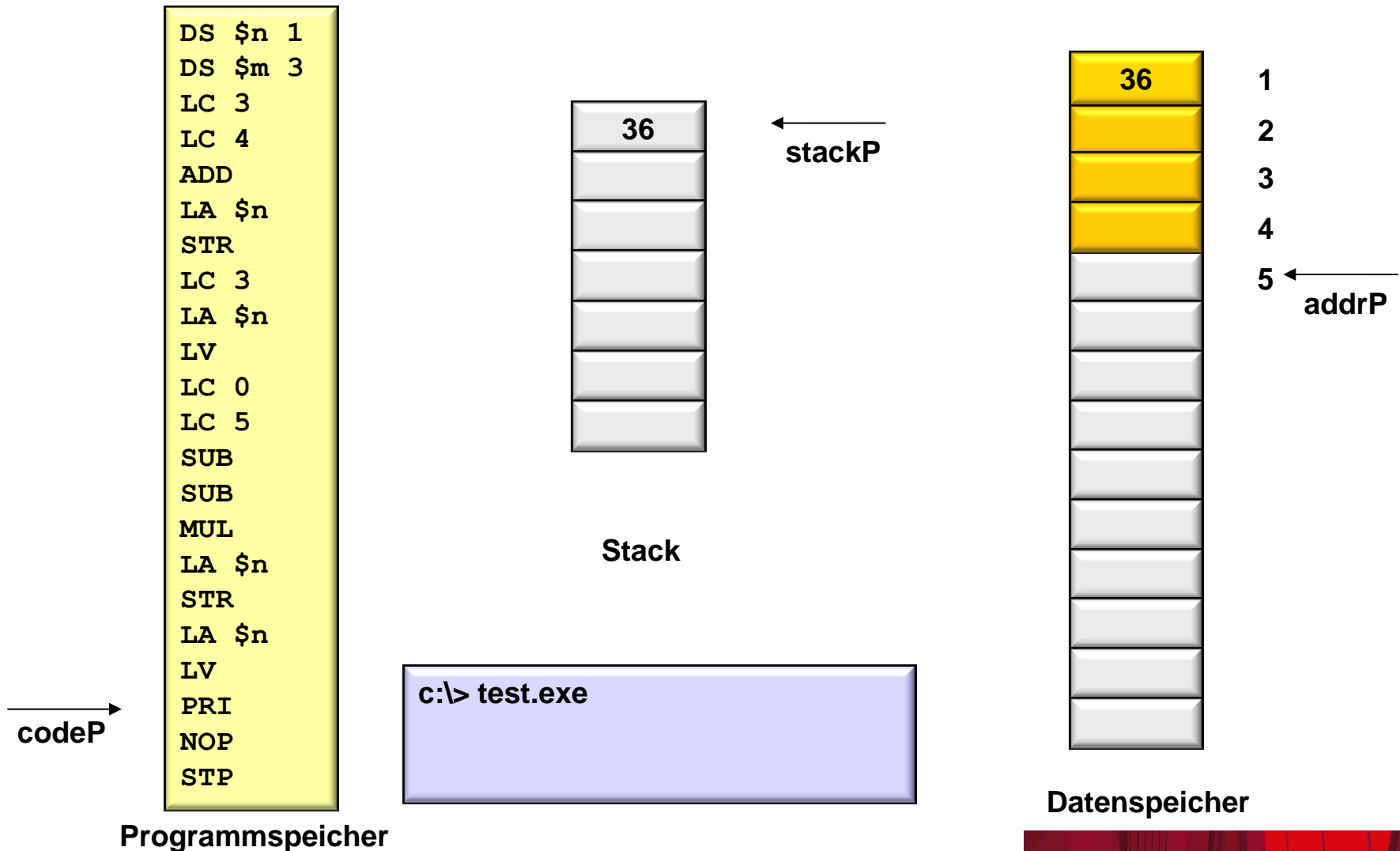


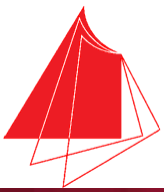
Eine einfache Stack-Maschine



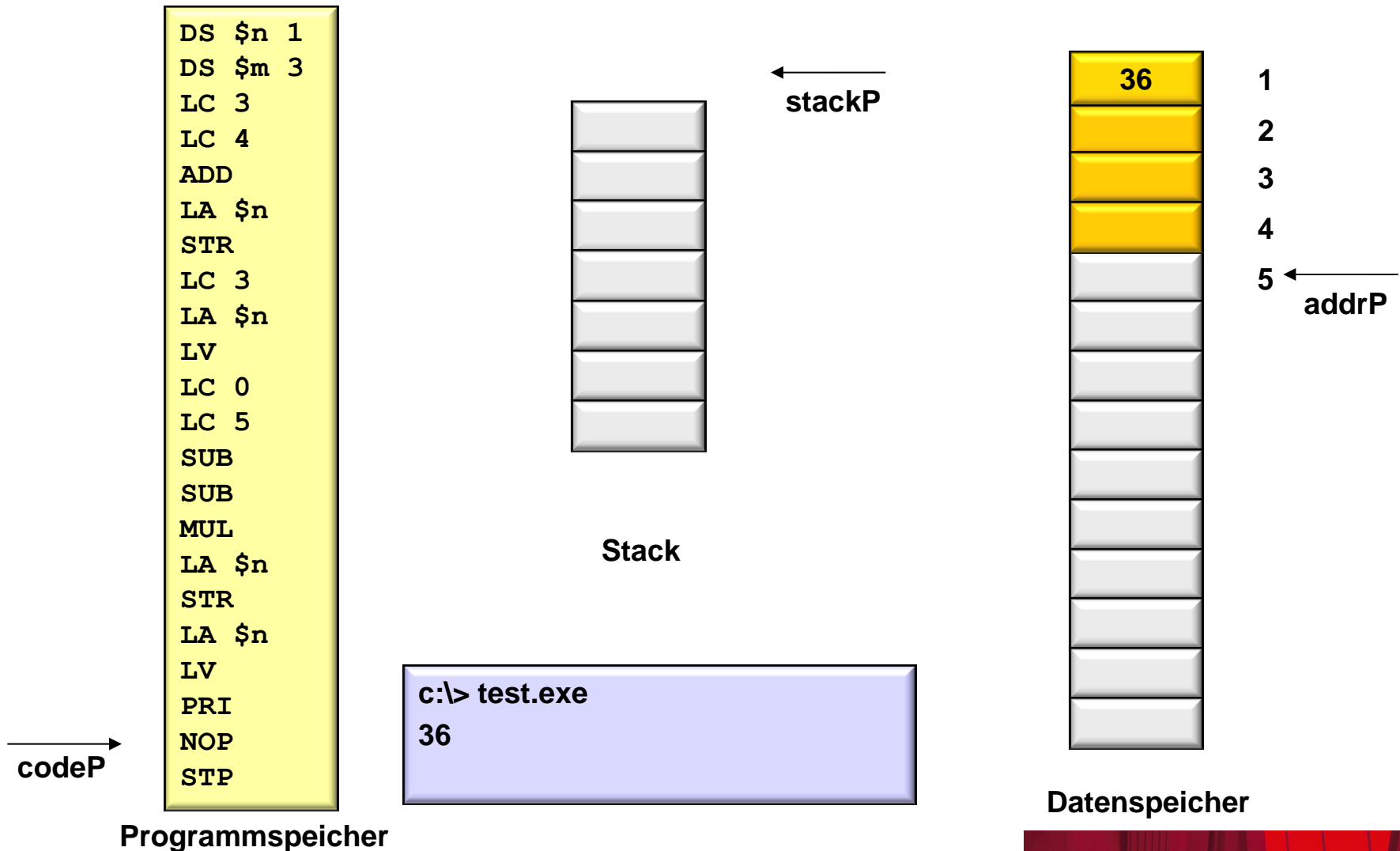


Eine einfache Stack-Maschine



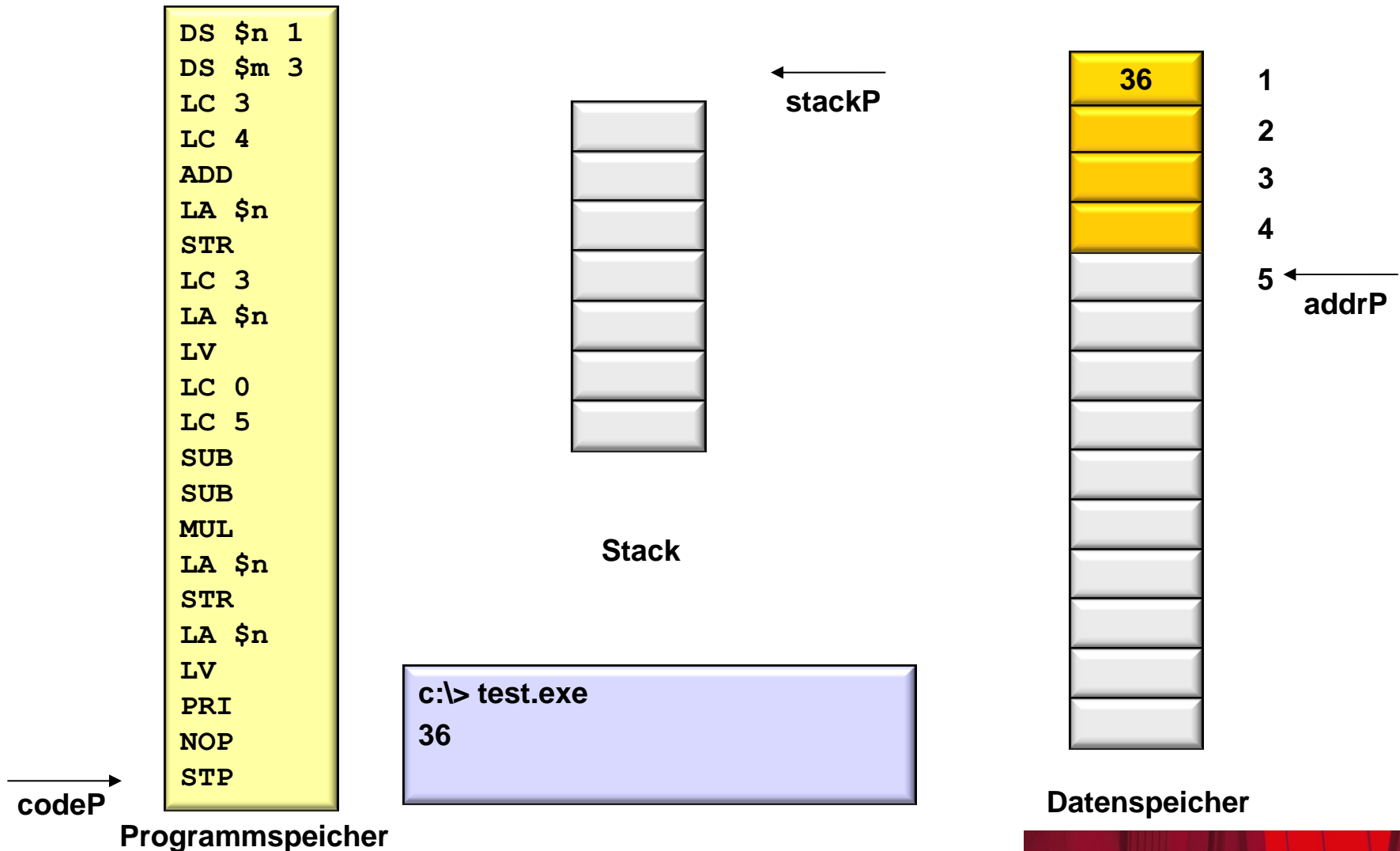


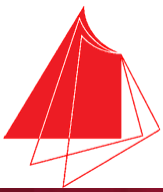
Eine einfache Stack-Maschine



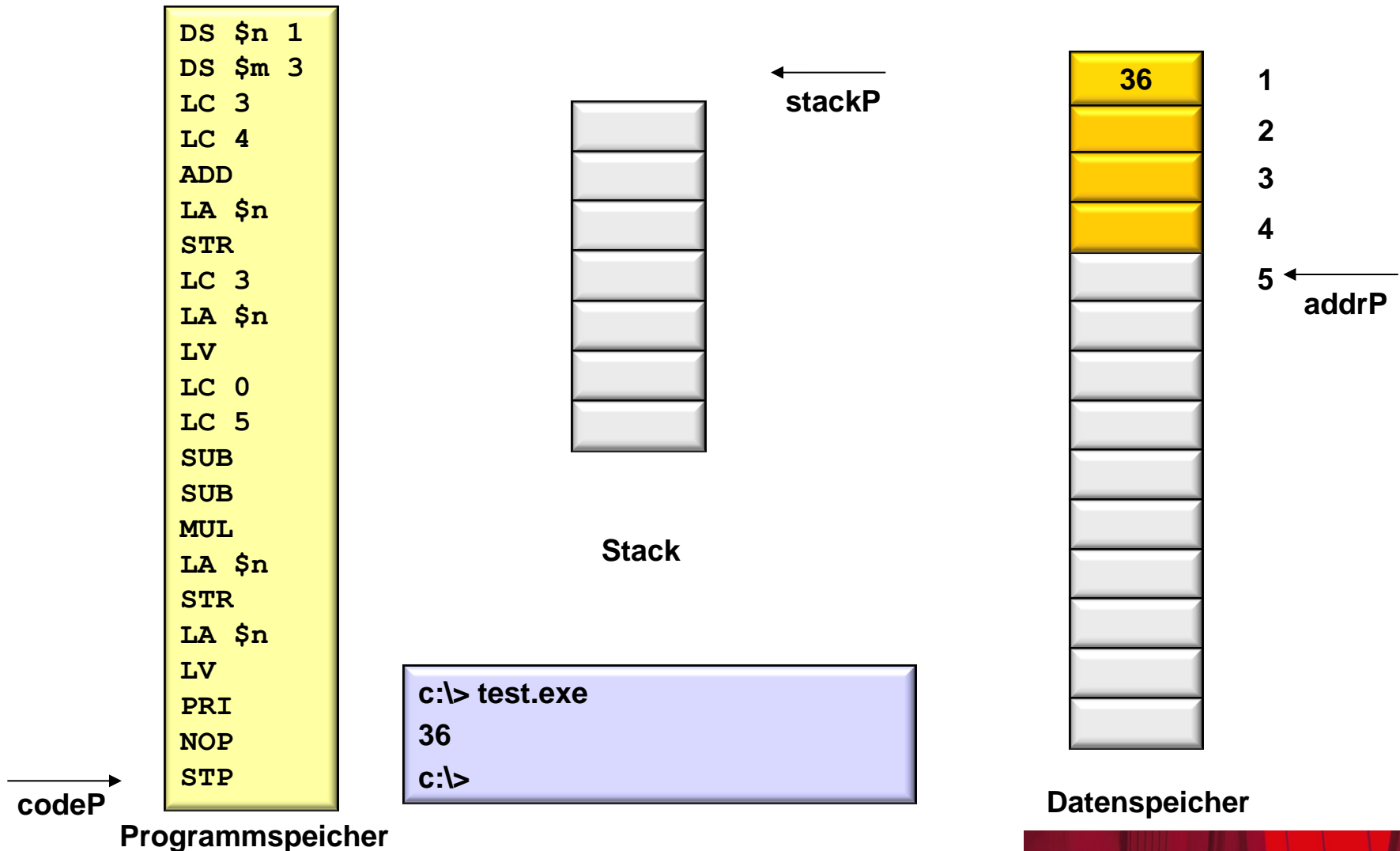


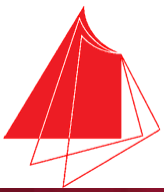
Eine einfache Stack-Maschine





Eine einfache Stack-Maschine





Maschinenbefehle

CMD | CMD argument | label CMD | label CMD argument

- **Arithmetik-Befehle ohne Argument**

- Addition für Integer

– **ADD**

```
codeP++;  
*(stackP-1) = *(stackP-1)  
              + *stackP;  
stackP--;
```

- Subtraktion für Integer

– **SUB**

```
codeP++;  
*(stackP-1) = *(stackP-1)  
              - *stackP;  
stackP--;
```

- Multiplikation für Integer

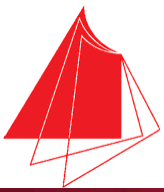
– **MUL**

```
codeP++;  
*(stackP-1) = *(stackP-1)  
              * *stackP;  
stackP--;
```

- Division für Integer

– **DIV**

```
codeP++;  
*(stackP-1) = *(stackP-1)  
              / *stackP;  
stackP--;
```



Maschinenbefehle

CMD | CMD argument | label CMD | label CMD argument

- **Vergleiche ohne Argument**

- Kleiner für Integer
 - **LES**

```
codeP++;
if (*(stackP-1) < *stackP)
    *(stackP-1) = 1;
else *(stackP-1) = 0;
stackP--;
```
- Gleich für Integer
 - **EQU**

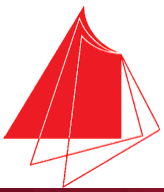
```
codeP++;
if (*(stackP-1) == *stackP)
    *(stackP-1) = 1;
else *(stackP-1) = 0;
stackP--;
```

- **Logische Operationen ohne Argument**

- Konjunktion für Integer – **AND**

```
codeP++;
if (*(stackP-1) != 0
    && *stackP != 0)
    *(stackP-1) = 1;
else *(stackP-1) = 0;
stackP--;
```
- Negation für Integer – **NOT**

```
codeP++;
if (*(stackP) == 0 )
    *stackP = 1;
else *stackP = 0;
```



Maschinenbefehle

CMD | CMD argument | label CMD | label CMD argument

Laden, Speichern

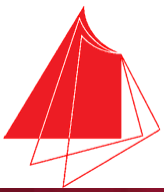
- Laden einer Speicheradresse (mit Argument) – **LA variable**
`codeP += 2; stackP++;`
`*stackP = addr(variable);`
- Laden einer Konstante (int) (mit Argument) – **LC c**
`codeP += 2; stackP++;`
`*stackP = c;`
- Laden eines gespeicherten Werts (ohne Argument) – **LV**
`codeP++;`
`*stackP = **stackP;`
- Speichern eines Werts (ohne Argument) – **STR**
`codeP++;`
`**stackP = *(stackP-1);`
`stackP -= 2;`

Einlesen und Drucken ohne Argument

- Drucken eines Integers – **PRI**
`codeP++;`
`println(*stackP);`
`stackP--;`
- Einlesen eines Integers – **REA**
`codeP++; stackP++;`
`*stackP = read();`

Sprünge mit Argument

- Unbedingter Sprung – **JMP #label**
`codeP = *label`
`// springt an die mit`
`// *label markierte Codezeile`
- Bedingter Sprung – **JIN #label**
`if(*stackP == 0)`
`codeP = *label;`
`else codeP += 2;`
`stackP--;`



Maschinenbefehle

CMD | CMD argument | label CMD | label CMD argument

- Speicher reservieren mit Argument – **DS identifier size**

```
codeP+=3;  
addr(identifier) = addrP;  
addrP += size;
```

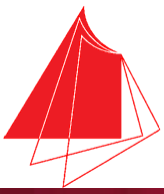
- Was noch fehlt

- Nichts tun (ohne Argument) – **NOP**

```
codeP++;
```

- Stoppen (ohne Argument) – **STP**

```
exit();
```



Code-Erzeugung: makeCode

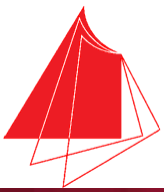
```
makeCode (PROG ::= DECLS STATEMENTS){  
  makeCode(DECLS); makeCode(STATEMENTS);  
  code << " STP " ;}
```

```
makeCode (DECLS ::= DECL ; DECLS ){  
  makeCode(DECL ); makeCode(DECLS); }
```

```
makeCode (DECLS ::=  $\epsilon$ ){ }
```

```
makeCode(DECL::= int ARRAY identifier){  
  code << " DS " << "$" << getLexem(identifier); makeCode(ARRAY)}
```

```
makeCode(ARRAY ::= [ integer ] ) { code << getValue(integer) ;}  
makeCode(ARRAY ::=  $\epsilon$  ) {code << 1;}
```



Code-Erzeugung: makeCode

```
makeCode (STATEMENTS ::= STATEMENT ; STATEMENTS){  
    makeCode(STATEMENT ); makeCode(STATEMENTS);}
```

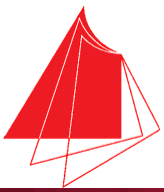
```
makeCode (STATEMENTS ::=  $\epsilon$ ){code << " NOP "};}
```

```
makeCode (STATEMENT ::= identifier INDEX := EXP ){ makeCode(EXP);  
    code << " LA " << "$" << getLexem(identifier) ; makeCode(INDEX); code << " STR "; }
```

```
makeCode (STATEMENT ::= write( EXP ) ){ makeCode(EXP);  
    code << " PRI "; }
```

```
makeCode (STATEMENT ::= read( identifier INDEX ) ){  
    code << " REA ";  
    code << " LA " << "$" << getLexem(identifier); makeCode(INDEX); code << " STR "; }
```

```
makeCode (STATEMENT ::= { STATEMENTS } ){ makeCode(STATEMENTS); }
```



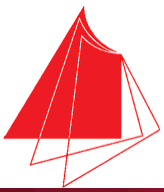
Code-Erzeugung: makeCode

```
makeCode (STATEMENT ::= if ( EXP ) STATEMENT else STATEMENT ){  
  makeCode(EXP);  
  code << " JIN " << "#" << label1; // label1 ist neu  
  makeCode(STATEMENT );  
  code << " JMP " << "#" << label2; // label2 ist neu  
  code << "#" << label1 << " NOP ";  
  makeCode(STATEMENT );  
  code << "#" << label2 << " NOP ";;}
```

```
if (exp) stat1  
else stat2;  
  
=  
  
If (!exp) goto m1;  
stat1; goto m2;  
m1: stat2;  
m2: ...
```

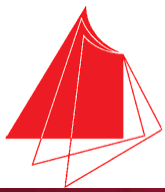
```
makeCode (STATEMENT ::= while ( EXP ) STATEMENT){  
  code << "#" << label1 << " NOP "; // label1 ist neu  
  makeCode(EXP);  
  code << " JIN " << "#" << label2; // label2 ist neu  
  makeCode(STATEMENT );  
  code << " JMP " << "#" << label1;  
  code << "#" << label2 << " NOP ";;}
```

```
while (exp) stat;  
  
=  
  
m1: If (!exp) goto m2;  
stat; goto m1;  
m2: ...
```



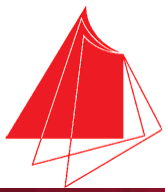
Code-Erzeugung: makeCode

```
makeCode (EXP ::= EXP2 OP_EXP ){  
  if (OP_EXP.type == noType ) makeCode(EXP2);  
  else if (OP_EXP.OP.type == opGreater) {  
    makeCode(OP_EXP); makeCode(EXP2); code << "LES";}  
  else if (OP_EXP.OP.type == opUnequal) {  
    makeCode(EXP2); makeCode(OP_EXP); code << "NOT";}  
  else { makeCode(EXP2); makeCode(OP_EXP); } }  
  
makeCode (INDEX ::= [ EXP ]){makeCode(EXP); code << " ADD ";}  
makeCode (INDEX ::= ε){}  
  
makeCode (EXP2 ::= ( EXP )){ makeCode(EXP); }
```



Code-Erzeugung: makeCode

```
makeCode (EXP2 ::= identifier INDEX){  
    code << " LA " << "$" << getLexem(identifier) ; makeCode(INDEX); code << " LV " ;}  
  
makeCode (EXP2 ::= integer ){ code << " LC " << getValue(integer) ;}  
  
makeCode (EXP2 ::= - EXP2){  
    code << " LC " << 0  
    makeCode(EXP2);  
    code << " SUB " ;  
}  
  
makeCode (EXP2 ::= ! EXP2){  
    makeCode(EXP2);  
    code << " NOT " ;  
}
```



Code-Erzeugung: makeCode

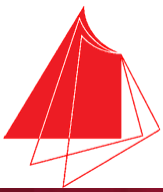
```
makeCode (OP_EXP ::= OP EXP ){  
  makeCode(EXP);  
  makeCode(OP); }
```

```
makeCode (OP_EXP ::= ε){}
```

```
makeCode (OP ::= +) { code << "ADD";}  
makeCode (OP ::= -) { code << "SUB";}  
makeCode (OP ::= *) { code << "MUL";}  
makeCode (OP ::= :) { code << "DIV";}  
makeCode (OP ::= <) { code << "LES";}  
makeCode (OP ::= >) { ;}  
makeCode (OP ::= =) { code << "EQU";}  
makeCode (OP ::= <: >) { code << "EQU";}  
makeCode (OP ::= &) { code << "AND";}
```

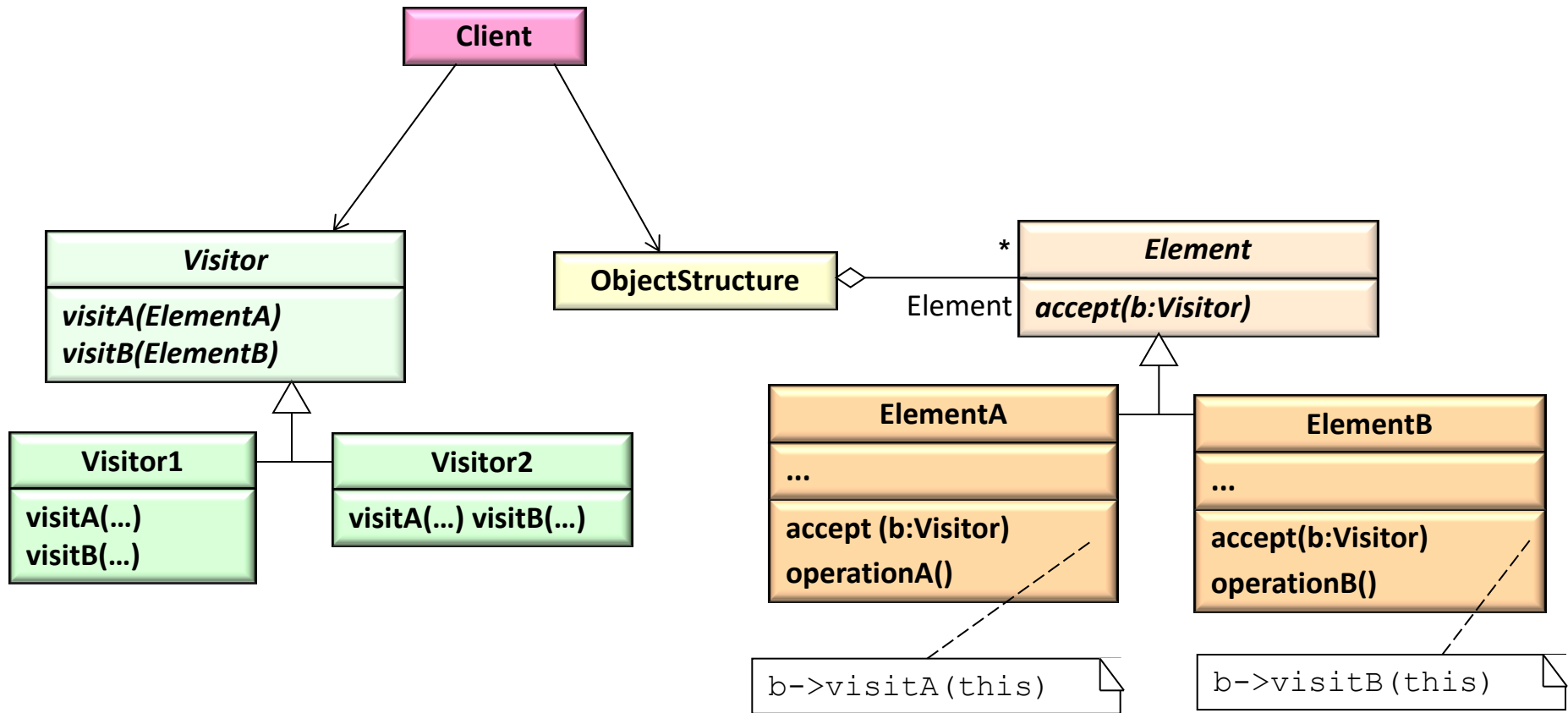
// siehe EXP ::= EXP2 OP_EXP

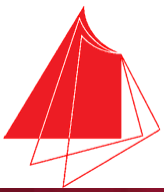
// siehe EXP ::= EXP2 OP_EXP



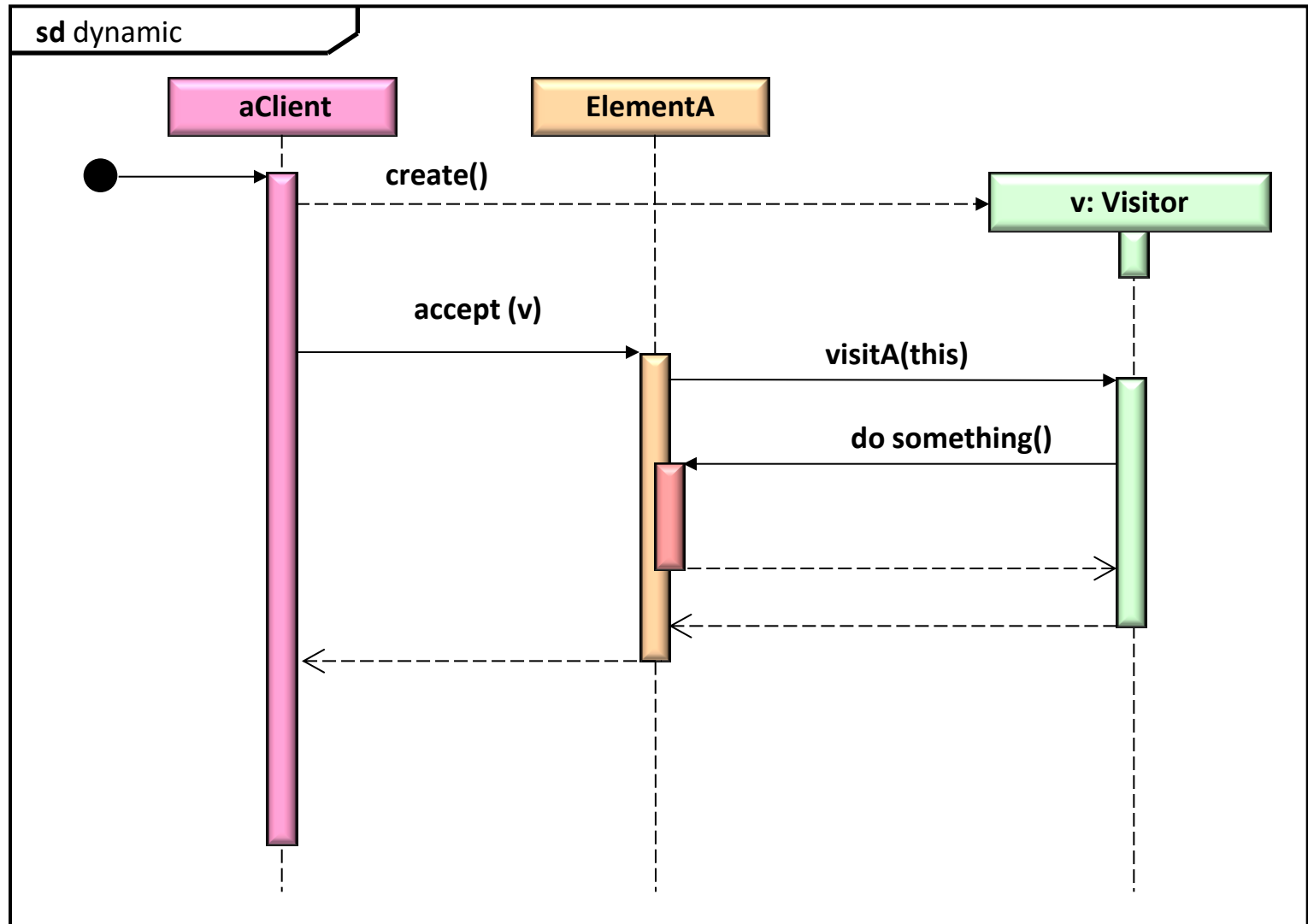
Alternativen: 1. Ein Besucher

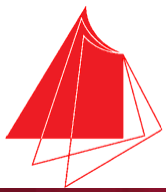
Auskopplung der Funktionalität über einen Besucher:



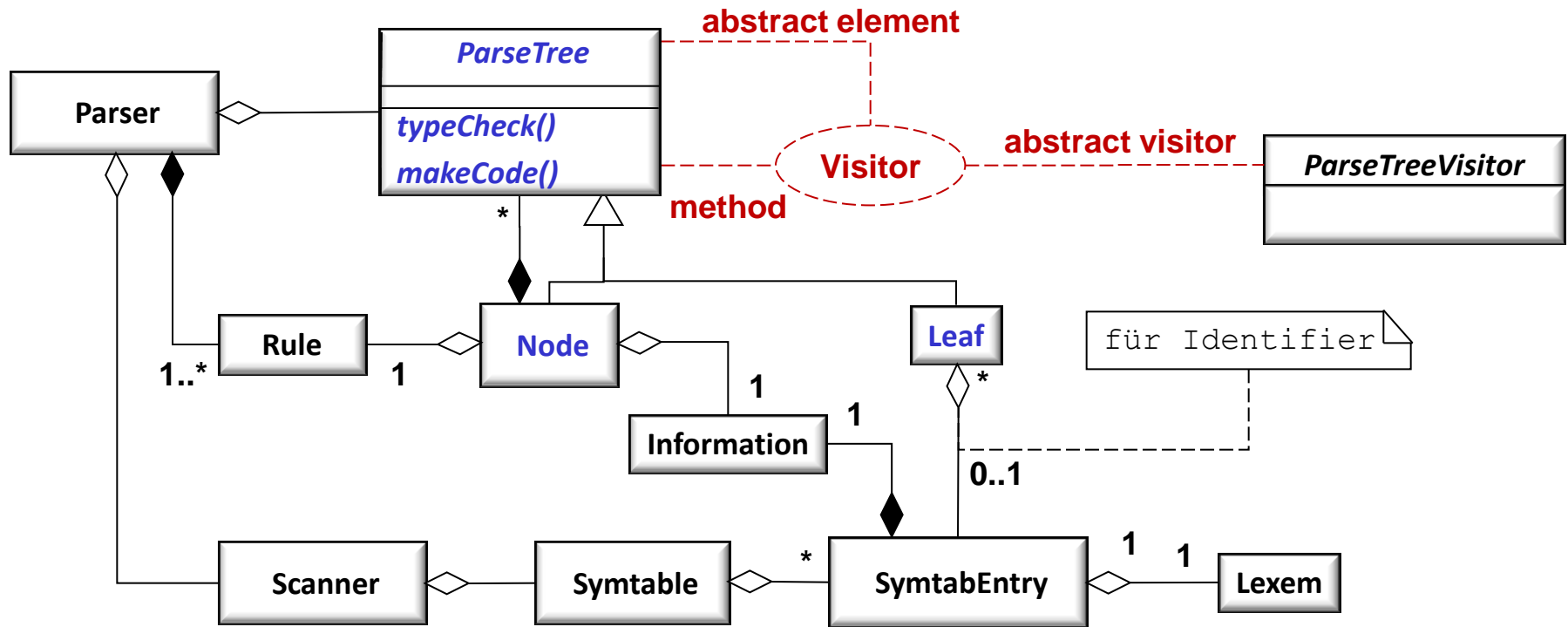


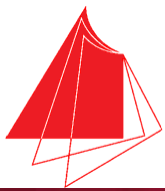
Dynamisches Verhalten





Zuordnungen





Das erwartete Ziel

