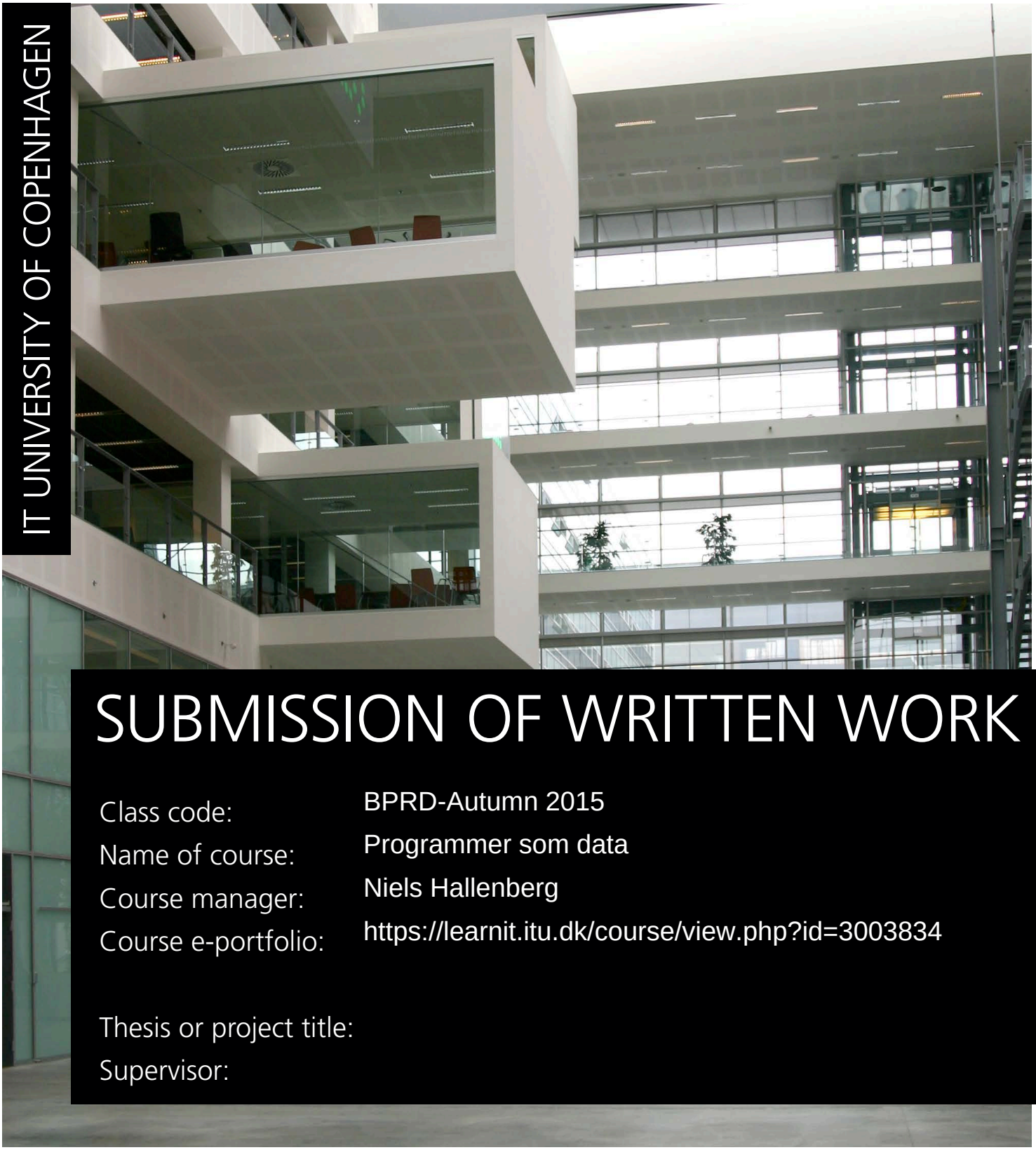
IT UNIVERSITY OF COPENHAGEN



SUBMISSION OF WRITTEN WORK

Class code:	BPRD-Autumn 2015
Name of course:	Programmer som data
Course manager:	Niels Hallenberg
Course e-portfolio:	https://learnit.itu.dk/course/view.php?id=3003834
Thesis or project title:	
Supervisor:	

	Full Name:	Birthdate (dd/mm-yyyy):	E-mail:
1.	Anders Wind Steffensen	10/02-1993	awis@itu.dk
2.			@itu.dk
3.			@itu.dk
4.			@itu.dk
5.			@itu.dk
6.			@itu.dk
7.			@itu.dk

Programmer som data (BPRD-Autumn 2015) - Eksamen januar 2016

Anders Wind Steffensen: awis@itu.dk

Jeg erklærer hermed at jeg selv har lavet hele denne eksamensbesvarelse uden hjælp fra andre.

Opgave 1

1.1)

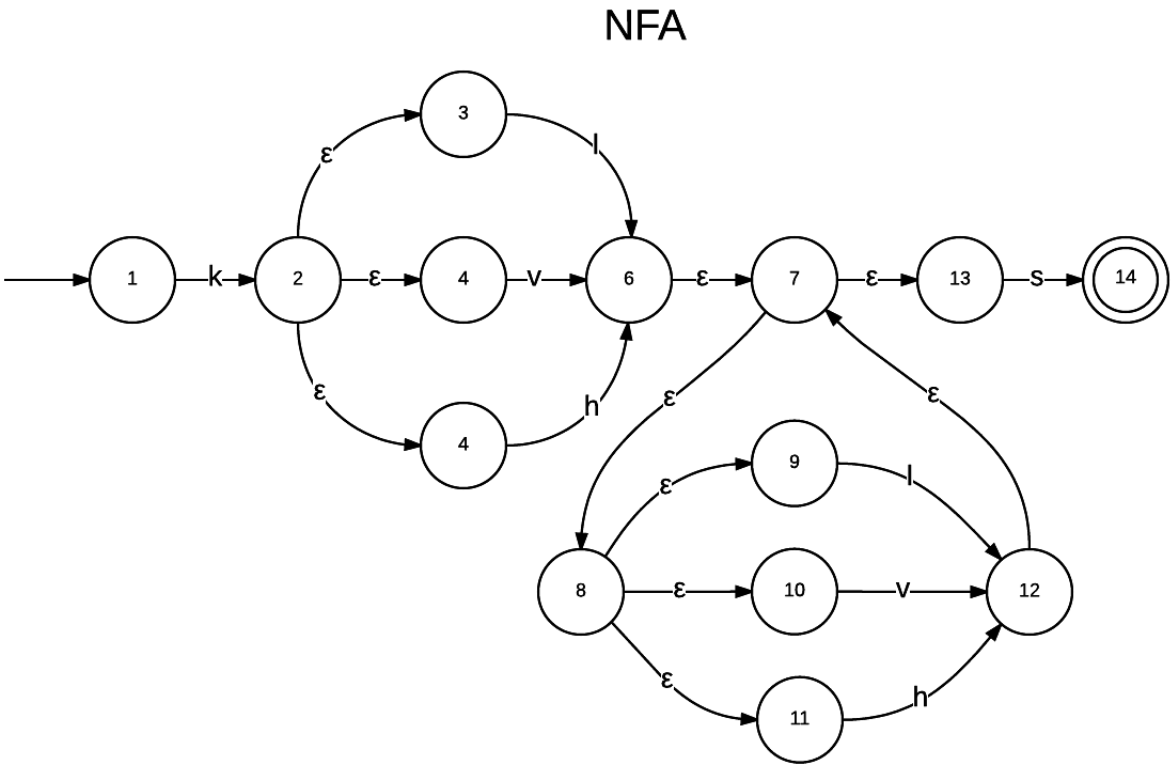
- *kls*
- *khs*
- *kvs*
- *klhvs*
- *kvhls*
- *kllls*
- *khhlls*
- *khvvvhhs*

Udtrykket matcher sprog som starter med *k*. Efterfulgt af *k* skal der være én eller flere optrædelser (i vilkårlig orden), af enten *l*, *v* eller *h*. Sproget skal afsluttes med et *s*.

1.2)

Jeg har baseret løsningen ud fra metoden beskrevet i Basics of Compiler Design. Muligvis kan man ikke lave denne præcise opbygning for sammenkædede | konstruktioner, men at de altså skulle have været splitet ud således at man havde formen: $a|b$ hvor $b = c|d$. Jeg har taget udgangspunkt i at $a+$ svarer overens til: $aa*$

Den udarbejdede NFA kan ses på figuren herunder.



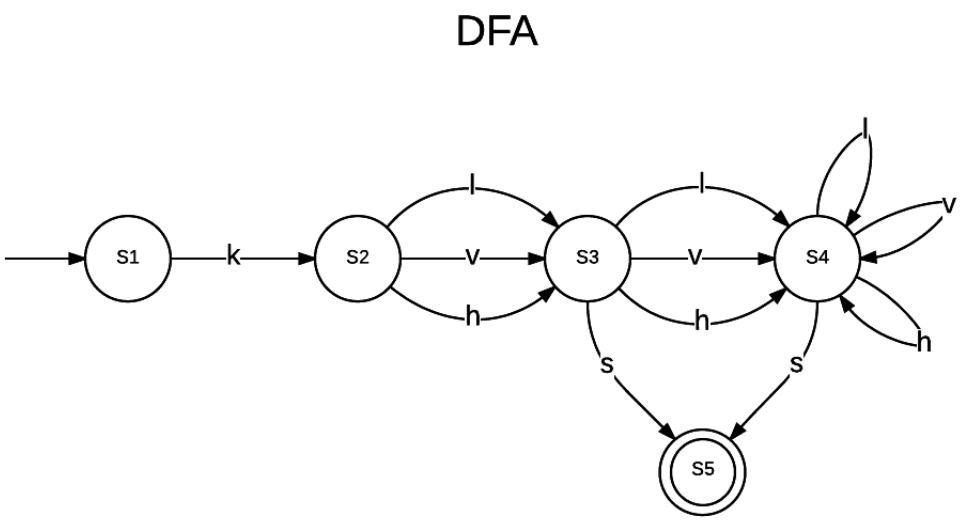
Som det kan ses på figuren er startstaten **1** og acceptstaten **14**.

1.3)

Jeg har benyttet mig af algoritemn beskrevet i Basics of Compiler Design. Algoritmens resultat kan ses i tabellen herunder

State	k	l	v	h	s	NFA states
S1	S2	Ø	Ø	Ø	Ø	1
S2	Ø	S3	S3	S3	Ø	2, 3, 4, 5
S3	Ø	S4	S4	S4	S5	6, 7, 8, 9, 10, 11, 13
S4	Ø	S4	S4	S4	S5	7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
S5	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	14

På figuren herunder ses den udarbejdede DFA.



Som det kan ses på figuren er startstaten **S1** og acceptstaten **S5**.

1.4)

Jeg har udarbejdet følgende regex: `(l|hl|vl)+`

Den matcher på alle de strenge der er givet i opgave beskrivelsen, samt undgår at matche på de: *lv*, *lh*, *lvv*, *lvh*, *lhv* og *lhh*. Eftersom at den har 3 elementer inde i sit repiterede element vil der per iteration være 3 i n'nde strenge der matcher.

Opgave 2

2.1)

Ændringer i Absyn:

```
type expr =
  | CstI of int
  | CstB of bool
  | Var of string
  | Let of string * expr * expr
  | Prim of string * expr * expr
  | If of expr * expr * expr
  | Letfun of string * string * expr * expr    (* (f, x, fBody, letBody) *)
  | Call of expr * expr
  | Ref of expr
  | Deref of expr
  | UpdRef of expr * expr
```

2.2)

Ændringer i HigherFun:

```
type value =
  | Int of int
  | Closure of string * string * expr * value env       (* (f, x, fBody, fDeclEnv) *)
```

```
  | Refvalue of value ref
```

2.3)

Ændringer i HigherFun:

```
let rec eval (e : expr) (env : value env) : value =
    match e with
    ...
    | Ref e             -> RefVal (ref (eval e env))
    | Deref e           -> let value = eval e env
                           match value with
                           | RefVal refv -> !refv
                           | _ -> failwith "Deref did not get a refvalue"
    | UpdRef (e1,e2)    -> let value1 = eval e1 env
                           match value1 with
                           | RefVal refv -> let value2 = eval e2 env
                                            refv := value2
                                            value2
                           | _ -> failwith "Updref did not get a refvalue"
```

Der er altså tilføjet 3 nye matches. Disse matches håndterer hver af de nye expr typer.

- `Ref e`: returnerer en `RefVal` med resultatet af den evaluerede `e` i det nuværende environment `env` refereret til med F# reference notation.
- `Deref e`: evaluerer `e` i det nuværende environment `env` og matcher det med en `RefVal`. I dette tilfælde benyttes F# deref notationen `!ref` til at returnere værdien i `RefVal` uden at det er en reference. Hvis `e` ikke bliver evalueret til en `RefVal` fejler den `eval`
- `UpdRed (e1, e2)`: Først tjekkes det at `e1` er en `RefVal` type ligesom i `Deref`. Herefter evalueres `e2` i environment `env`, og reference værdien af resultatet af det evaluerede `e1`, updateres med F# update ref notation `:=` til resultat af det evaluerede `e2`. Hvis `e1` ikke bliver evalueret til en `RefVal` fejler den `eval`.

2.4)

```
> run (Letfun ("f", "x", Deref(Var "x"), Call(Var "f", Ref(CstI 1))));;
val it : HigherFun.value = Int 1

> run (Deref(Ref(UpdRef(Ref(UpdRef(Ref(CstI 1),CstI 2)),CstI 3))));;
val it : HigherFun.value = Int 3

> run (Let("x", Ref(CstI 1), UpdRef(Var "x", CstI 2)));;
val it : HigherFun.value = Int 2

> run (Prim("=", CstI 2, Deref(Ref(Prim("+", CstI 1, CstI 1)))));;
val it : HigherFun.value = Int 1
```

2.5)

Ændringer i FunLex.fsl:

```
let keyword s =
    match s with
    ...
    | "ref"   -> REF
    | _       -> NAME s

rule Token = parse
    ...
    | '!'             { EXMARK }
    | ":="            { UPDOP }
    | eof             { EOF }
    | _               { failwith "Lexer error: illegal symbol" }
```

Ændringer i FunLex.fsy:

```
%token UPDOP EXMARK REF

%left ELSE              /* lowest precedence  */
%left EQ NE UPDOP
%right REF EXMARK
%nonassoc GT LT GE LE
%left PLUS MINUS
%left TIMES DIV MOD
%nonassoc NOT           /* highest precedence  */

Expr:
...
    | Expr UPDOP Expr                     { UpdRef($1, $3)         }
;

AtExpr:
      Const                             { $1                     }
    | NAME                              { Var $1                 }
    | REF Expr                          { Ref $2                 }
    | EXMARK Expr                       { Deref $2               }
    | Expr UPDOP Expr                   { UpdRef($1, $3)         }
    | LET NAME EQ Expr IN Expr END      { Let($2, $4, $6)        }
    | LET NAME NAME EQ Expr IN Expr END { Letfun($2, $3, $5, $7) }
    | LPAR Expr RPAR                    { $2                     }
;
```

Som det kan ses er der tilføjet i lexeren 3 nye matches. `ref` til REF token, `!` til EXMARK og `:=` til UPDOP. Disse er også oprettet i parser specifikationen. REF og EXMARK er højreassociative eftersom de ligger sig op af det udtryk der står til højre for dem. UPDOP derimod fungerer som EQ og er venstreassociativ.

- I `Expr` bliver `UpdRef` "mapped". Den kræver at der er en Expr før og efter update operatoren og dermed kan matche på `(e1):=(e2)`.
- I `AtExpr` bliver `Ref` "mapped". Den kræver at den har en expr eftersig således at den kan være på formen `ref (e)`.
- I `AtExpr` bliver `Deref` "mapped". Den kræver at den har en expr eftersig således at den kan være på formen `Deref (e)`.

2.6)

Eksempler fra sektion 2.3:

```
> fromString "let x = ref 1 in if !x=1 then x:= 2 else 42 end";;
val it : Absyn.expr = Let ("x",Ref (CstI 1), If (Prim ("=",Deref (Var "x"),CstI 1),UpdRef (Var "x",CstI 2),CstI 42)
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 2

> fromString "let x = ref 2 in (x:=3) + !x end";;
val it : Absyn.expr = Let ("x",Ref (CstI 2),Prim ("+",UpdRef (Var "x",CstI 3),Deref (Var "x")))
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 6
```

Egne eksempler fra sektion 2.4:

```
> fromString "let f x = !x in f ref 1 end";;
val it : Absyn.expr = Letfun ("f","x",Deref (Var "x"),Call (Var "f",Ref (CstI 1)))
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 1

> fromString "!(ref ((ref ((ref 1):=2)):=3))";;
val it : Absyn.expr = Deref (Ref (UpdRef (Ref (UpdRef (Ref (CstI 1),CstI 2)),CstI 3)))
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 3

> fromString "let x = ref 1 in x:=2 end";;
val it : Absyn.expr = Let ("x",Ref (CstI 1),UpdRef (Var "x",CstI 2))
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 2

> fromString "2=!(ref (1+1))";;
val it : Absyn.expr = Prim ("=",CstI 2,Deref (Ref (Prim ("+",CstI 1,CstI 1))))
> run it;;
val it : HigherFun.value = Int 1
```

2.7)

Det udarbejdede typetræ kan ses på figuren herunder

$$\dfrac{\dfrac{}{\rho \vdash 2 : t3}(\text{p1})}{\rho \vdash \text{ref } 2 : t2}(\text{ref}) \quad \dfrac{\dfrac{\dfrac{\rho'(x) = \forall\alpha_1,..,\alpha_n.t2}{\rho' \vdash x : t1 \text{ ref}}(\text{p3}) \quad \dfrac{}{\rho' \vdash 3 : int}(\text{p1})}{\rho' \vdash x := 3 : t1}(:=) \quad \dfrac{\dfrac{\rho'(x) = \forall\alpha_1,..,\alpha_n.t2}{\rho' \vdash x : t1 \text{ ref}}(\text{p3})}{\rho' \vdash !x : t1}(!)}{\rho' = \rho\,[\forall\alpha_1,..,\alpha_n.t2] \vdash (x := 3) + !x : t1}(\text{p4})}{\rho \vdash \text{Let } x = \text{ref } 2 \text{ in } (x := 3) + !x \text{ end} : t1}(\text{p6})$$

- Typen *t1* = `int`
- Typen *t2* (x's type) = `t3 ref` = `int ref`
- Typen *t3* = `int`

Altså ses det at den endelige type er: `int`. Der er også overenstemmelse mellem de værdier der udledes af regel p1 og de værdier x bliver slået op til at være med regel p3. Jeg har ikke sat type værdierne ind på alle pladserne, men de værdier der står i punkterne herover kunne sættes direkte ind på deres respektive pladser. Ved reglerne p1, p4 er det blevet evalueret at *t1*, og *t3* typen var int. Ved "ref" reglen kunne jeg udlede at *t2* var af typen "*t3* ref". Reglen p3 blev brugt til at slå "x"s type op i *ρ*, hvori x var fastsat til typen *t2*.

Opgave 3

3.1)

Ændringer i Absyn.fs:

```
and expr =
| Access of access                 (* x    or  *p    or  a[e]     *)
| Assign of access * expr          (* x=e  or  *p=e  or  a[e]=e   *)
| Addr of access                   (* &x   or  &*p   or  &a[e]    *)
| CstI of int                      (* Constant integer            *)
| CstN                             (* Constant nil                *)
| CstS of string                   (* Constant string             *)
...
```

Ændringer i CPar.fsy:

```
AtExprNotAccess:
      Const                             { CstI $1              }
    | CSTSTRING                         { CstS $1              }
    ...
;
```

Ændringer i Comp.fs:

```
and cExpr (e : expr) (varEnv : varEnv) (funEnv : funEnv) : instr list =
```

```
    match e with
    | Access acc     -> cAccess acc varEnv funEnv @ [LDI]
    | Assign(acc, e) -> cAccess acc varEnv funEnv @ cExpr e varEnv funEnv @ [STI]
    | CstI i         -> [CSTI i]
    | CstN           -> [NIL]
    | CstS s         -> [CSTS s]
```

Ændringer i Machine.fs

```
type instr =
    ...
    | SETCDR                            (* set second field of cons cell   *)
    | CSTS of string                    (* add string on the stack         *)


let CODECSTS   = 32;

let makelabenv (addr, labenv) instr =
    match instr with
    ...
    | SETCDR         -> (addr+1, labenv)
    | CSTS s         -> (addr+(2 + (String.length s)), labenv)

let explode s = [for c in s -> int c]

let rec emitints getlab instr ints =
    match instr with
    ...
    | SETCDR         -> CODESETCDR :: ints
    | CSTS s         -> CODECSTS   :: (String.length s) :: ((explode s) @ ints)
```

Ændringer i listmachine.c

```
#define STRINGTAG 1

#define CSTS 32

int execcode(int p[], int s[], int iargs[], int iargc, int /* boolean */ trace) {
        ...
        case CSTS: {
            int lenStr = p[pc++];
            int sizeStr = lenStr + 1; // Extra for zero terminating string, \0.
            int sizeW = (sizeStr % 4 == 0)?sizeStr/4:(sizeStr/4)+1; // 4 chars per word
            sizeW = sizeW + 1; // Extra for string length.
            word* strPtr = allocate(STRINGTAG, sizeW, s, sp);
            s[++sp] = (int)strPtr;
            strPtr[1] = lenStr;
            char* toPtr = (char*)(strPtr+2);
            for (int i=0; i<lenStr; i++)
            toPtr[i] = (char) p[pc++];
            toPtr[lenStr] = '\0'; // Zero terminate string!
            printf ("The string \"%s\" has now been allocated.\n", toPtr); /* Debug */
        } break;
        default:
            printf("Illegal instruction %d at address %d\n", p[pc-1], pc-1);
            return -1;
        }
    }
}
```

> Jeg er kommet frem til at `CSTS s` i makelabenv skal bruge: *addr + 2 + længden af strengen* antal ord instruktioner, eftesom at det i opgavebeskrivelsen er nævnt at hvert tegn bruger et ord og at en streng har header der fylder 1 ord og længden af strengen der også fylder 1 ord. Ud over det der står i opgavebeskrivelsen har jeg tilføjet linjerne `let CODECSTS = 32;` og `#define CSTS 32` i henholdsvis Machine.fs og listmachine.c. Uden dette havde compileren ikke en måde at oversætte instruktionerne. En streng vil altså af lexeren laves om til token `CSTS` af typen string. Parseren vil herefter matche det og lave det om til typen `CstS s` fra Absyn hvor s er strengen. Compileren laver denne type om til instruktionen `CSTS s` hvor s er strengen. Denne vil herefter blive lavet om til stakkode og i sidste ende bytekode der kan køre i listmaskinen.

Resultatet af kørslen af testprogrammet givet i opgavebeskrivelsen giver det forventede resultat:

```
listmachine Opgave3Tests.out
The string "Hi there" has now been allocated.
The string "Hi there again" has now been allocated.

Used   0.000 cpu seconds
```

3.2)

For at skaffe den abstrakte syntax har jeg modificeret parseren: parse.fs

```
let fromFile (filename : string) =
    use reader = new StreamReader(filename)
    let lexbuf = (*Lexing.*)LexBuffer<char>.FromTextReader reader
    try
        let result = CPar.Main CLex.Token lexbuf
        printf "%a" result
        result
    with
        | exn -> let pos = lexbuf.EndPos
            failwithf "%s in file %s near line %d, column %d\n"
                (exn.Message) filename (pos.Line+1) pos.Column
```

Dette er den abstrakte syntaks der bliver dannet af parseren givet det eksempel der stod i opgaveteksten.

```
Prog
    [Fundec
        (null,"main",[],
         Block
            [Dec (TypD,"s1"); Dec (TypD,"s2");
             Stmt (Expr (Assign (AccVar "s1",CstS "Hi there")));
             Stmt (Expr (Assign (AccVar "s2",CstS "Hi there again"))))])]
```

De sidste to statements, som er de nye der er tilføjet, er en `CstS` type med en streng som parameter. Dette passer overens med den kode der er lavet. `CstS` ligger inde i en `Assign`, med variablerne *s1* og *s2*.

Altså svarer `Stmt (Expr (Assign (AccVar "s1",CstS "Hi there")))` til `s1 = "Hi there";` og `Stmt (Expr (Assign (AccVar "s2",CstS "Hi there again")))` svarer til `s2 = "Hi there again;"`. `Dec (TypD,"s1");` og `Dec (TypD,"s2");` svarer til `dynamic s1;` og `dynamic s2;` hvilket også er forventet. Alle disse statements og Declerations er inde i en block som tilsammen udgør hele `void main()` metodens krop.

Note til opgave 3: Jeg blev nød til at flytte min kode over på en MAC maskine og compile mit eksempel med listcc. Det skyldes en bug på Windows som gør at man ikke kan bruge listcc til at tage et program (.lc) uden at en exception opstår (Method not found ...). Diskussion-forum's løsningen fra November hjalp kun til at compile selve listmachine.c men ikke at benytte den efterfølgende.

Opgave 4

4.1)

Ændringer i CLex.fsI

```
rule Token = parse
    ...
    | "!"             { NOT }
    | ".<"            { DOTLT }
    | ".>"            { DOTGT }
    | ".<="           { DOTLE }
    | ".>="           { DOTGE }
    | ".=="           { DOTEQ }
    | ".!="           { DOTNE }
    | '('             { LPAR }
    ...
```

Ændringer i CPar.fsy

```
%right ASSIGN             /* lowest precedence */
%nonassoc PRINT
%left SEQOR
%left SEQAND
%left EQ NE DOTEQ DOTNE
%nonassoc GT LT GE LE DOTGT DOTLT DOTLE DOTGE
%left PLUS MINUS
%left TIMES DIV MOD
%nonassoc NOT AMP
%nonassoc LBRACK          /* highest precedence  */

ExprNotAccess:
    ...
    | Expr Check Expr Check Expr          { Andalso(Prim2($2,$1,$3), Prim2($4,$3,$5)) }
;

Check:
      DOTLT                               { "<"                 }
    | DOTGT                               { ">"                 }
    | DOTLE                               { "<="                }
    | DOTGE                               { ">="                }
    | DOTEQ                               { "=="                }
    | DOTNE                               { "!="                }
;
```

Løsningen består altså af en række nye tokens tilsvarende de forskellige boolske operatorer. Derudover har parseren fået en ny gruppe: `CHECK` som returnerer en string med deres tilsvarende boolske operator fx `.<` til `<`, `.==` til `==` osv. Denne streng kan hefter ligges ind i en `Prim2`s første parameter da denne tager imod string notation af operatorerne. I ExprNotAccess gruppen er der tilføjet et enkelt match som er i formen af interval check. Den første og midterste `Expr` bliver kædet sammen til en `Prim2` med den første check operator. Den midterste og sidste `Expr` bliver kædet sammen af den anden check operator. Et `Andalso` binder de to boolske check sammen.

4.2)

Jeg har lavet følgende test program.

```
void main() {
    print 2 .< 3 .< 4;
    print 3 .< 2 .== 2;
    print 3 .> 2 .== 2;
    print (3 .> 2 .== 2) == (3 .> 1 .== 1);
    print (3 .> 2 .== 2) == 1;
    // prints 1 0 1 1 1

    println; // True true
    print -1 .< 2 .> -2;
    print 1 .== 1 .!= 2;
    print 1+4 .>= 5-1 .<= 100-10;
    print (1 .== 1 .== 1) .== 1 .< 3;
    // prints 1 1 1 1

    println; // false false
    print -1 .> 2 .< -2;
    print 1 .!= 1 .== 2;
    print 1+4 .<= 5-1 .>= 100-10;
    // prints 0 0 0
```

```
    println; // true false
    print -1 .< 2 .< -2;
    print 1 .== 1 .== 2;
    print 1+4 .>= 5-1 .>= 100-10;
    // prints 0 0 0

    println; // false true
    print -1 .> 2 .> -2;
    print 1 .!= 1 .!= 2;
    print 1+4 .<= 5-1 .<= 100-10;
    // prints 0 0 0

    int x;
    x = 5;
    println; // True true
    print x .== x .== x;
    print x .== 5 .== x;
    print 5 .== x .== 5;
    // prints 1 1 1
}
```

Note: linjen "print (1 .== 1 .== 1) .== 1 .< 3;" er lidt et misbrug af typer eftersom at vi benytter os af at `true` *svarer til* `1` *og derfor er det ligemed 1.*

For at køre det har jeg:

```
fslex --unicode CLex.fsl
fsyacc --module CPar CPar.fsy
fsi -r %HOMEDRIVE%%HOMEPATH%/FsYacc/Bin/FsLexYacc.Runtime.dll Absyn.fs CPar.fs CLex.fs Parse.fs Machine.fs Comp.fs ParseAndComp.fs

open ParseAndComp;;
compileToFile (fromFile "Opgave4-2-Tests.c") "tests.out";;
#q;;
```

og så kørt det i javamaskinen:

```
javac Machine.java
java Machine tests.out
```

Hvilket printer de rigtige resultater. Jeg har tjekket at interval tjekket korrekt kan håndtere at resultaterne af første og anden side af den midterste værdi. Dette har jeg gjort ved at teste: (true, true), (true, false), (false, true) og (false,false) hvoraf det kun er (true,true) der skal print true/1. Derudover har jeg også prøvet at kæde dem sammen således at resultatet af en check interval godt kan inkluderes i en anden check interval. Jeg har også undersøgt at alle de nye operatorer kan give både true og false. Som en sidste ting har jeg også testet at man kan benytte sig af expressions og ikke blot værdier, blandandet i linjen `print 1+4 .>= 5-1 .<= 100-10;` og `print x .== 5 .== x;`.