

Virtuel forsøgsplanlægning og optimering af kerneproduktion

Dr.-Ing. Ingo Wagner og Dr.-Ing. Jörg C. Storm,
MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen

Sammenfatning

Processimulering anvendes i stigende grad i forbindelse med kernefremstilling. God forudsigelighed af procesforløbet under kerneskydning og afhærdning af kerner fremstillet med normalt anvendte bindemiddelsystemer, gør det muligt på en effektiv måde at designe nyt kernefremstillingsværktøj og finde målrettede løsninger på produktionsproblemer.

Til simulering af kernefremstilling findes nu omfattende muligheder for anvendelse af systematisk virtuel forsøgsplanlægning og autonom optimering. Softwaren muliggør at forskellige målsætninger forfølges, at en række forskellige parametre samtidigt varieres, og at kvalitetskriterier kan vurderes kvantitativt. Den autonome optimering forbinder de forskellige interaktioner mellem værktøj og processens parametre med den forventede kerne kvalitet. Støberifagmanden bliver effektivt understøttet i sit arbejde med at konstruere robust værktøj til kvalitetssikre og økonomisk forsvarlige kernefremstillingsprocesser.

Indledning

Under kernefremstilling kan der optræde mange problemer der kan påvirke det endelige resultat og tidligere kunne disse problemer kun løses ved hjælp af støberifagmandens erfaring og støberitekniske viden. Da alle detaljer ikke kan overskues under de virkelige produktionsforhold, og produktionsvariationer ofte ikke kan måles,

indebærer kernefremstilling derfor en afgørende risikofaktor for en robust støbegodsproduktion.

Simulering af kernefremstilling er i praksis blevet til et effektivt værktøj til konstruktion af værktøj og til løsning af produktionsproblemer [1, 2]. Værktøjets design bliver nu baseret på fysiske sammenhænge og giver nye og innovative fremstillingsforslag. Produktionsvariationer kan allerede i designfasen minimeres via et godt konstrueret værktøj og robuste procesbetingelser.

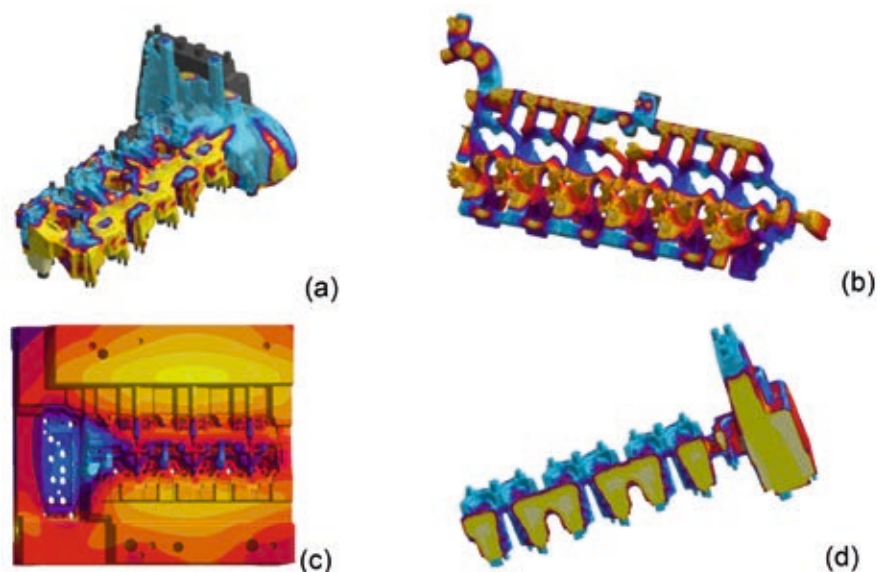
Anvendelsen af innovative metoder til virtuelle eksperimenter og forsøgsplanlægning på computere byder banebrydende muligheder for vidtgående automatisering

og regelbaseret procesdesign af kernefremstillingen.

Dette er forudsætningen for allerede i planlægningsfasen at kunne skabe transparente procesbetingelser og dermed et væsentligt element i målet om at kunne digitalisere kernefremstillingen.

Konventionel simulering af kerneproduktion

Simulering af kerneskydning og begasning for forskellige bindemiddelsystemer, herunder temperaturstyring af værktøjer, udgør en procesrækkefølge for kernefremstilling (figur 1). Tydeliggørelsen af den procesrelevante fysik er



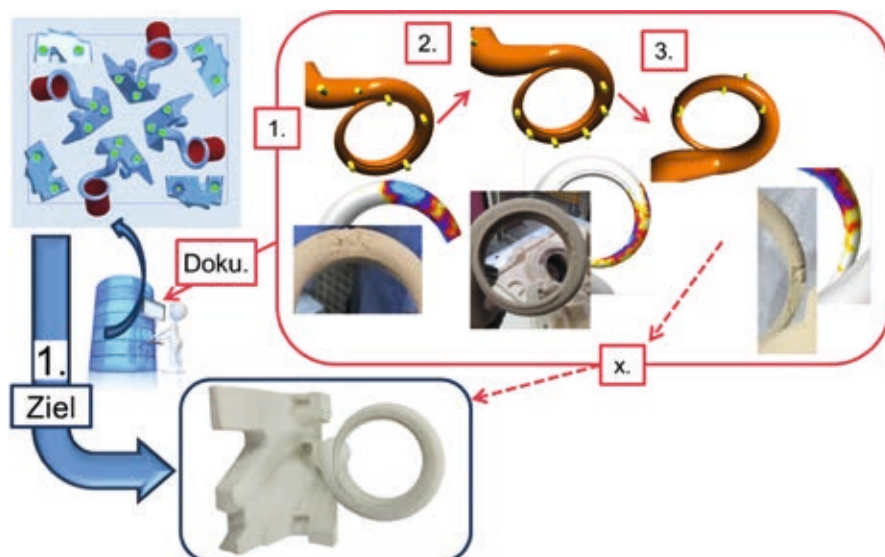
Figur 1: Eksempler på kernesimulering: a) kerneskydning, b) gasafhærdning coldbox, c) temperatur af opvarmet kernekasse, og d) tørring uorganisk binder.

en forudsætning for en realistisk forudsigtelse af de ofte simultane processer. Under kerneskydning skal der kunne beregnes, hvordan strømning af sand og luft hænger sammen, når de to stoffer kan bevæge sig uafhængigt af hinanden [1]. Ved aminbegasning af polyurethan coldbox-bindere eller ved tørring af kerner fremstillet med uorganiske bindere i opvarmede kernekasser beregnes transporten såvel som fordampning og kondensering af amin eller bindervandet gennem den porøse kerne på basis af de fysiske procesbetingelser.

Evalueringen af simuleringresultaterne med hensyn til robustheden af fremstillingsværktøjs procesvariationer har hidtil påhvilet den erfarne støberifagmand. Den praktiske ekspertise, der er nødvendigt til værktøjsfremstilling og til at træffe de rigtige beslutninger for kernefremstillingsprocesserne vil blive understøttet og udvidet med simuleringværktøjer, således hurtigere og mere sikre beslutninger kan træffes. Anvendelsen af processimulering allerede under udviklingsfasen for støbegodset og fremstillingsværktøjet yder et væsentligt bidrag til fejleliminering og især til at undgå værktøjsrelaterede fejl. I de tilfælde hvor der findes flere muligheder for at fremstille en kerne, kan der ved hjælp af simulering hurtigt muligt vælges den mest egnede løsning.

De virtuelle forsøg med hver sin simulation gennemføres i henhold til med den eksperimentelle fremgangsmåde. En eller flere procesparametre ændres. De selvjusterende virkninger observeres og vurderes. Fra dette afleder støberifagmanden de eventuelt nødvendige ændringer og udfører næste simulering (figur 2). Denne proces gentages, indtil kernekassen udformning anses for at være egnet til serieafprøvning.

Ved komplekse processer såsom kernefremstilling kan overblikket hurtigt tabes. Forholdet mellem de foretagne ændringer og de afledte reaktioner kan på grund af de forskellige interaktioner ikke altid tydeligt observeres. Hvor-



Figur 2: Den manuelle optimering ved gradvis ændring og prøvning (rød) af kernefremstillingsværktøjer er sædvanligvis bekostelig og ikke altid effektiv. Fyldningen af snelegangen i den viste turboladerkerne forbliver ufuldstændigt. Systematisk dokumentation af forandringer og de deraf følgende virkninger fremmer konstruktionen af robuste værktøjer, som fra starten kan produceres gode kerner (blå).

vidt resultatet af en ændring er til det bedre eller værre kan ofte kun vurderes ved at bestemme kernens tæthed - det vil sige at veje kernen. Flere ændringer af fremstillingsværktøjet resulterer i et stigende antal kombinationsmuligheder. Derved kan det nemt overses om en anden kombination kan have ført til et hurtigere eller bedre resultat.

Efter flere optimeringsforsøg er det ofte vanskeligt at kunne huske de forskellige værktøjsændringer. Spørgsmålet hvorfor og resultatet af ændringen kan derfor ikke længere besvares. Ved manuelle værktøjsoptimering er resultatet gerne en større kerneproduktion med færre kerner med fejl, men kvaliteten af det endelige resultat kan ikke vurderes. Det hedder blot, at den sidste ændring fungerer. Et konsekvent anvendt simuleringprogram understøtter ændringsdokumentationen og de afledte læringseffekter. Dette skaber efterfølgende et sæt regler for værktøjets design. De operationelle processer og metodologien er således ved at ændre sig til procesoptimering.

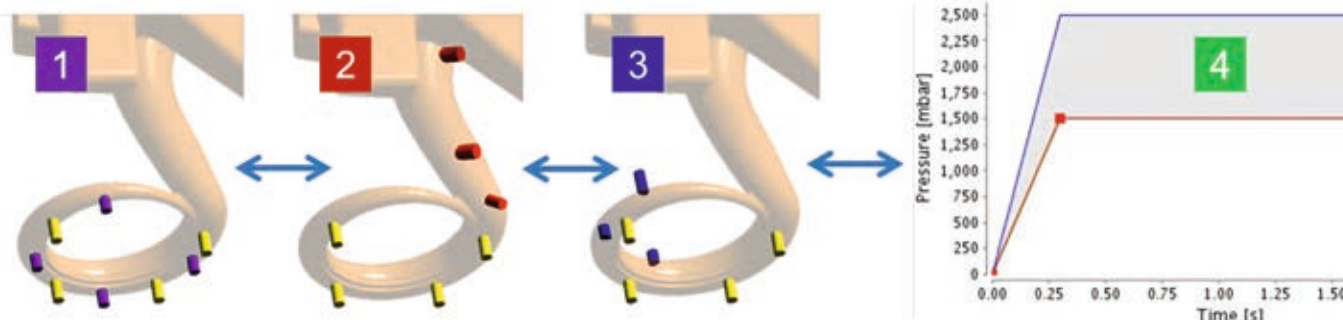
Fra manuelt simulering til virtuel optimering

Kernefremstillingsprocessen består af en kompleks kæde med flere parametre, der gensidigt påvirker hinanden. Afgørende for god og konsistent seriefremstillet kernekvalitet er udformningen af et robust værktøj.

Hvis et værktøj er forkert designet, kan det ikke altid rettes ved blot at optimere procesparametre eller at ændre sandsystemet, hvis det i det hele taget er praktisk muligt. De daglige procesoperationer udviser typisk procesvariationer. Kvaliteten eller især egenskaben af en kernesandblanding er ikke nøjagtigt reproducerbar, og procesvariabler såsom skydetryk eller trykopybygningen under skydningen kan ikke nødvendigvis styres nøjagtigt. Et robust fremstillet værktøj kan bedst kompensere for disse variationer.

Typiske frihedsgrader i værktøjet er:

- Antallet af kerner i formen (afhængig af kernestørrelse og eventuelt maskinstørrelse),



Figur 3: Parameterisering af geometriændringer for et virtuelt forsøg: Frihedsgrader af dysegrupper (1 til 3) blev systematisk aktiveret og deaktiveret. Derudover blev skydestrykket ændret i 3 trin (4). Kombinationen af alle varianter i en fuld-faktoriel test medfører her 24 ($= 2 * 2 * 2 * 3$) forskellige udformninger, der skal beregnes.

- Kerneplacering og kerneorientering,
- Placering, type og antal af skydedyser,
- Placering, type og antal udluftningsdyser,
- Udluftning gennem kernekassens deleflader.

Frihedsgraderne er ofte begrænset, fx fordi der kun kan skydes på kernens anvise, eller fordi visse kerneområder, hvor der stilles store krav til kernens overfladekvalitet, ikke kan skydes på. Hvis der kan anvendes forskellige kerneskydere skal deres egenskaber grundigt overvejes. Dette kan føre til, at en kerne ikke kan skydes på alle til rådighed værende kerneskydere.

Kerneværktøjer har typisk flere skyde- og udluftningsdyser, hvor placeringerne kan være variable. Dette giver en række forskellige kombinationsmuligheder, der påvirker den endelige kerne kvalitet og de økonomiske fremstillingsmuligheder.

Mulighederne for virtuelt forsøgsdesign og autonom optimering (autonom optimering eller reinforcement learning, hvor computeren bl.a. lærer nye reaktionsmønstre, som er baseret på de situationer, computeren er blevet udsat for, o.a.) gør det muligt at anvende en ny metodisk tilgang til værktøj og procesplanlægning. Baseret på klart definerede optimeringsmål tilføjes spillerum i softwaren, hvilket giver mulighed for, at tidligere

manuelle processen kan automatiseres og efterfølgende evalueres [3-4]. Parameterisering af geometrielementer gør det muligt automatisk at variere typen og placeringen af de forskellige dyser eller varmelegemer i opvarmede kernekasser. Samtidig kan typiske procesparametre som fx skydestryk, begasning, temperaturstyring eller kernsandets egenskaber varieres. Alle kvalitetskriterier, der optræder i simuleringen bliver automatisk vurderet kvantitativt og knyttet til de forskellige parametre. Derfra kan der for eksempel automatisk udledes en rangordnet vurdering af kernens kvalitet, der er tilknyttet de variable parametre. Statistisk baserede evalueringsmetoder giver en sikker og hurtig kvantitativ vurdering af vekselvirkningen mellem de forskellige parametre på kernens kvalitet eller økonomiske faktorer, og gør det muligt at udlede praktiske foranstaltninger. Kerneproduktionen bliver således virtuelt optimeret.

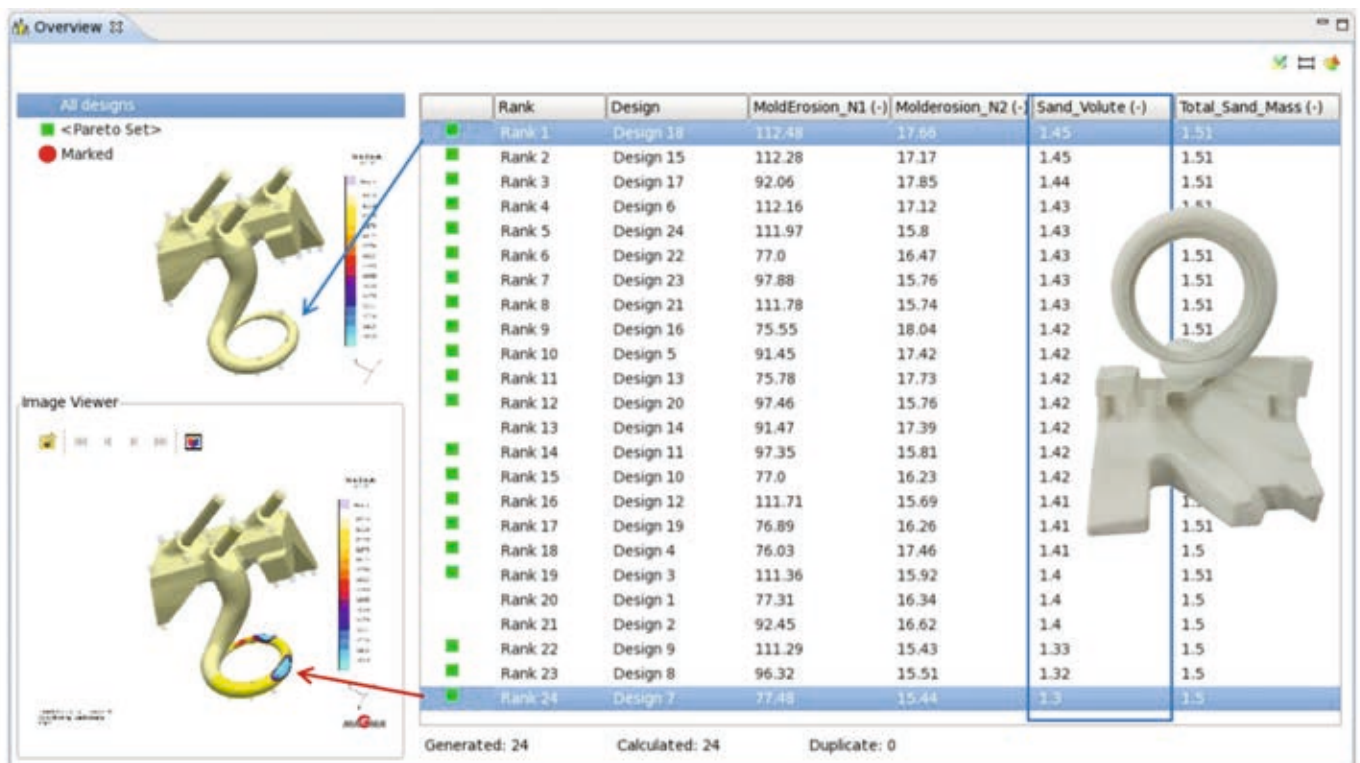
Generelt giver det ikke mening at gennemgå et uoverskueligt antal kombinationer fuldstændigt. Støberifagmandens opgave er at definere et passende udgangspunkt, der med en rimelig indsats fører til målet. De nye virtuelle muligheder fremmer nye effektive procedurer for systematisk og pålidelig målopfyldelse. I stedet for en gentagende gradvise fremgangsmåde beskrives processen med de variable størrelser struk-

turet og bearbejdes systematisk for på forhånd at kunne opnå sine procesmålsætninger.

Virtuel testplan for at reducere kernevrag af en turboladerkerne

Ved dette praktiske eksempel af en turboladerkerne bliver fremgangsmåden for virtuelle optimering forklaret tydeligt. Målet er optimering af værktøjet til seriefremstilling af en turboladerkerne for at minimere det høje vragsprocent med det nuværende værktøj. For serieværktøjet bliver følgende frihedsgrader undersøgt; variationer i udluftninger og skydestrykket. Ved manuel optimering førte disse foranstaltninger sammen med ændringen af kernesandbinderblandingen ikke til det ønskede resultat (figur 2). Ved den virtuelle optimering bliver udluftningsdysernes positioner og skydestrykket automatisk varieret (figur 3). Som kvalitetskriterier blev især sandets fyldningsgrad i kernens sneglegang og tendensen til værktøjsslid under skydedyserne vurderet.

Rækkefølgen af de evaluerede kvalitetskriterier kan vægtes efter prioriteter (figur 4). Fuldstændig fyldning af sneglegangen (Sand-Volute i figur 3) er i dette eksempel højere vægtet end værktøjsslidet (Mold Erosion i figur 3) under dysen. Således kan der hurtigt findes frem til det bedste kompromis, i dette tilfælde en



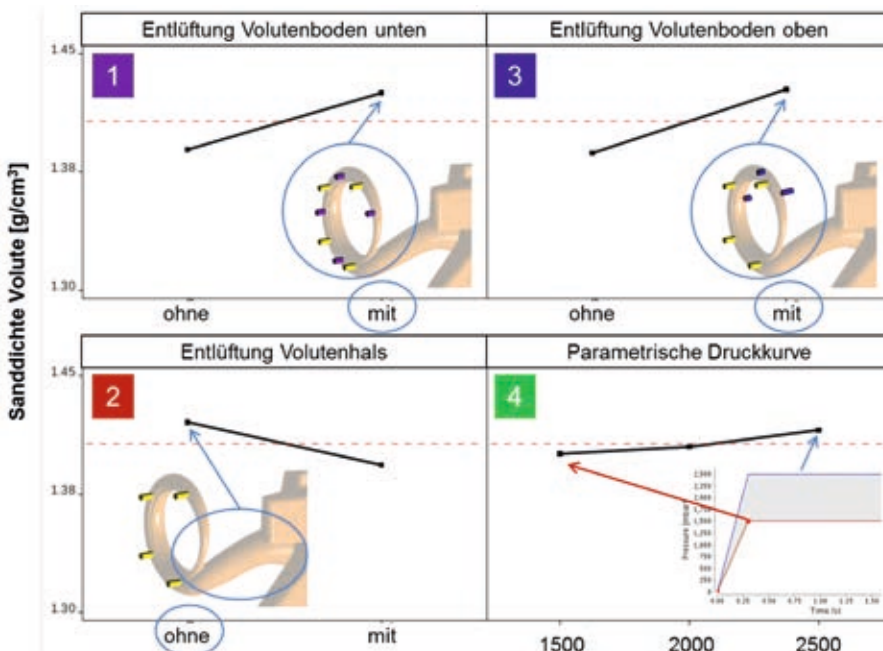
Figur 4: Rækkefølge af kerne kvalitet efter sneglegangens fyldningsgrad: med den efterfølgende vægtning af forskellige kvalitetskriterier, kan slidtendensen af værktøjet evalueres.

dysekonfiguration, der med det laveste skydetryk giver de bedste kerner med minimal værktøjsslid. Indflydelsen af de individuelle pa-

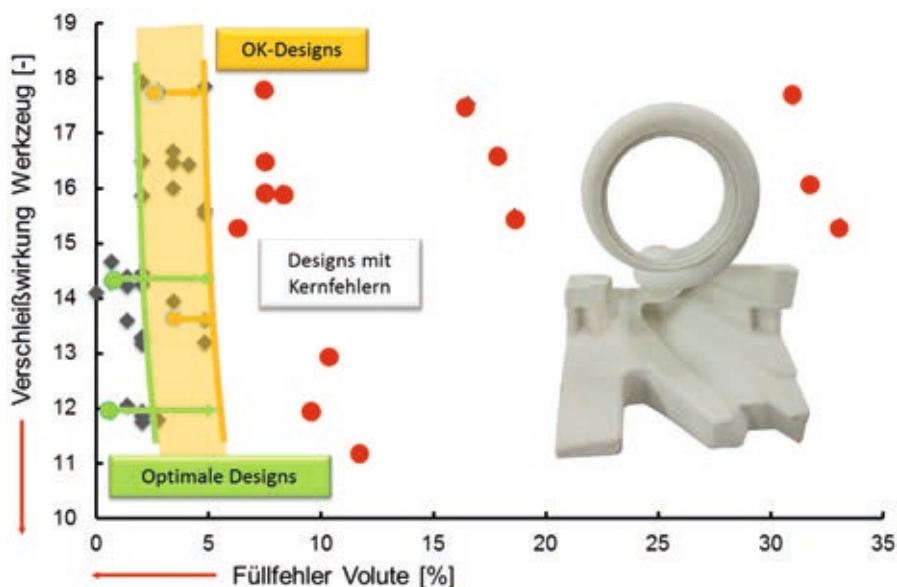
rametre på kvalitetskriteriet kan således kvantitativt evalueres (figur 5). Samspejlet mellem de variable størrelser evalueres via den

statistiske analyse. Yderligere udluftninger i sneglegangens bund forbedrer kernekvaliteten, ligesom en eliminering af udluftning i sneglegangens hals gør. Dermed kan regler og tydelige anvisninger for værktøjets konstruktion afledes. Ved lignende kerner kan værktøjer således fra starten målrettet designs.

Evalueringen viser, at en forøgelse af skydetryk kun medfører, at kernens kvalitet forbedres moderat. Værktøjets konstruktion og skydetryk er i praksis adskilte størrelser. Værktøjet er designet til at give fremstillingsprocessen sin robusthed, mens variationen i skydetryk er en kontrolvariabel for at forbedre kvaliteten af akutte produktionsproblemer. Har kernerne en dårlig kvalitet, fx pga. tilstoppede dyser eller en svingende kernesandkvalitet, øges sædvanligvis skydetrykket. Hjælper det, tages et øget værktøjsslid med i købet. Heraf kan vi lære, at parametre for værktøjsdesign og kronologisk underordnede procesparametre skal holdes adskilte for dermed at kunne forenkle op-



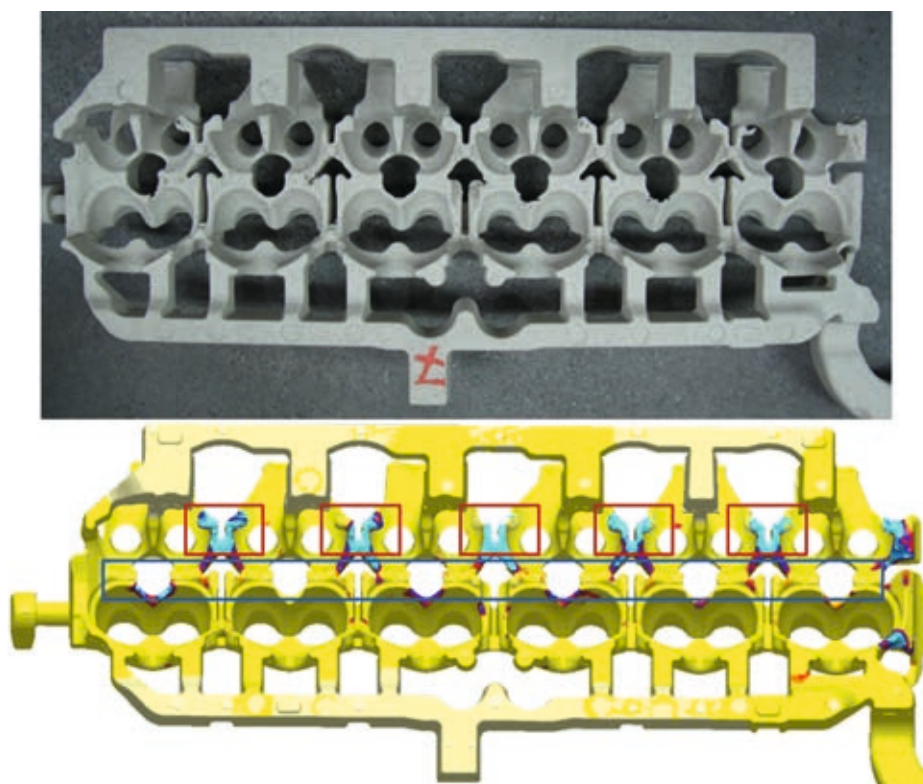
Figur 5: De vigtigste påvirkninger af de enkelte variable parametre på sanddensiteten i det kritiske område i sneglegangen: Yderligere dyser i sneglegangens bund og en reducere af udluftninger i sneglegangens hals fremmer fuldstændig fyldning. En trykforøgelse forbedrer resultatet ganske lidt, men på bekostning af en stigende tendens til værktøjsslid.



Figur 6: Den virtuelle optimering muliggør et robust værktøjsdesign, der også under mindre gunstige procesbetingelser kan give god kernekvalitet. Design t.v. for den grønne linje har på grund af bufferzonen (gult område) en høj tolerance over for fremstillingsvariationer.

timeringsprocessen. Er et værktøj designet robust, er der forskellige løsninger, hvormed gode kerner kan fremstilles (figur 6). Med godt

designede værktøjer kan i anden omgang afprøves, hvordan typiske fremstillingsvariationer i praksis kan påvirke kernekvaliteten.



Figur 7: (a) Lukket vandkappekerne, der med de forudbestemte procesbetingelserne viser fejl på forskellige steder og (b) tilsvarende resultat fra simuleringen. Kritiske områder er mellemsektionerne (rød) og forbrændingskammertoppene (blå). Ved gentagelser af skydeforsøgene varierer fejlbilledet, men fejltendens er den samme.

Ligeledes kan det via et virtuelt eksperimentelt design analyseres, hvilken designvariant er optimal for en effektiv begasning.

Metode til virtuel værktøjs- og procesoptimering i eksemplet med en vandkappekerne

Optimeringen af værktøjer og procesbetingelser for at kunne fremstille komplekse kerner, såsom tyndvæggede vandkappekerner, er i praksis ofte en langvarig proces. Ved store serier er også yderligere vilkår såsom optimering af vedligeholdelses- og rengøringsintervaller en vigtig økonomisk faktor.

I dette eksempel blev et produktionsværktøj undersøgt. Der fandtes allerede et stort antal eksperimentelle resultater, der kunne sammenlignes med simuleringsresultater. Formålet med optimeringen var at justere værktøj og fremstillingsprocessen således, at kerner af god kvalitet kunne produceres under gunstige økonomiske forhold. Til forskel fra de hidtidige produktionsforhold blev forskellige dysetyper afprøvet. Disse typer dyser kræver minimal rengøring af skydehoved og kan med minimal skydetryk give gode kerner. Ved anvendelse af disse dyser udviser kernerne forskellige fejl (figur 7). Denne tilstand er udgangspunktet for en systematisk optimering. Formålet er at minimere kernefejl i simuleringen. De undersøgte frihedsgrader for dette værktøj omfatter typen af skydedyser henholdsvis ændringen af dysernes skydeegenskaber, udluftningsvariationer i kernens kritiske områder, såvel som selve skydetrykket. Som et kvantitativ kvalitetskriterium måles sandets komprimering eller "sandtæthed" ved at veje kernerne.

For støberifagmanden er det klart, at de forskellige kernefejl forskellige steder i kernen er uafhængige af hinanden på grund af kernesandets lokale strømningforhold. Samtidig er fejllårsagerne

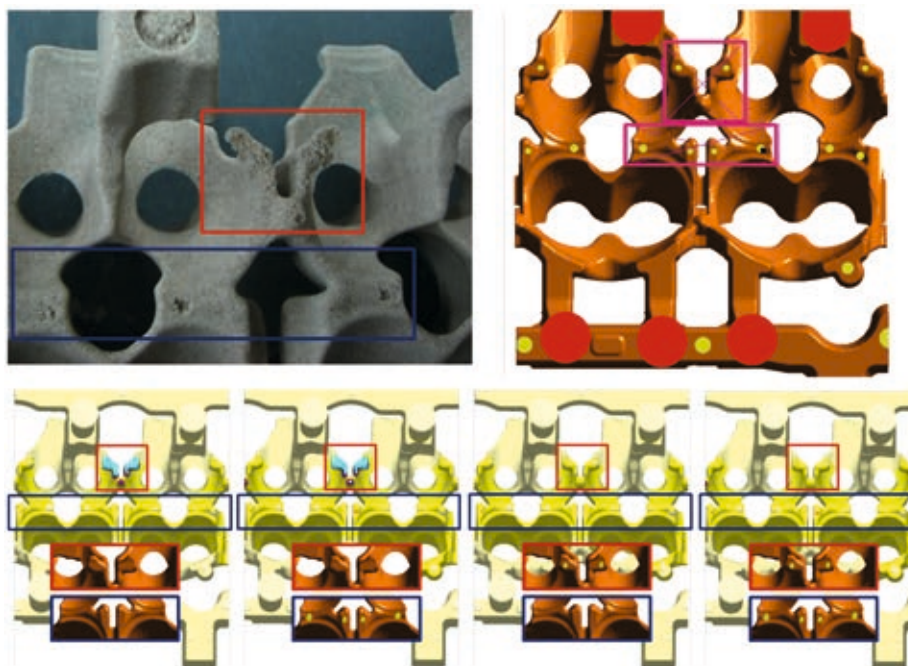
på de forskellige steder sammenlignelige. Spørgsmålet kan derfor behandles effektivt, hvis blot et udsnit af kernen bliver undersøgt. Hertil kommer, at opdeling af virtuel optimering i mindre delopgaver også gør det muligt at anvende et statistiske forsøgsdesign (Design of Experiments, DoE), som gør det praktisk muligt at reducere de beregnende variationsmuligheder.

Resultaterne af det eksperimentelle design med forskellige typer skydedyser og forskellige strømningsegenskaber af kernesandet viser at anvendelse af en standard trindelt skydedyse og almindeligt kernesand, og uden yderligere forbedring af strømningsegenskaber, giver et brugbart resultat. Hvis der anvendes simple dyser, som er nemmere at vedligeholde, opnås betydeligt flere kernefejl, så denne løsning vil ikke blive videreført til praktisk anvendelse.

I det andet virtuelle eksperimentelle designforsøg blev dysens og kernesandets egenskaber anvendt som faste randbetingelser. Formålet med parameterundersøgelsen var en afskaffelse af kernefejl i mellemsektionerne og forbrændingskammertoppene (se figur 7).

Frihedsgrader er udluftningsdyserne i de berørte fejlområder samt skydetrykket. De to dysegrupper åbnes eller lukkes systematisk, mens trykket varieres over fire trin. Dette resulterer i 16 forskellige designmuligheder, der skal beregnes hver for sig.

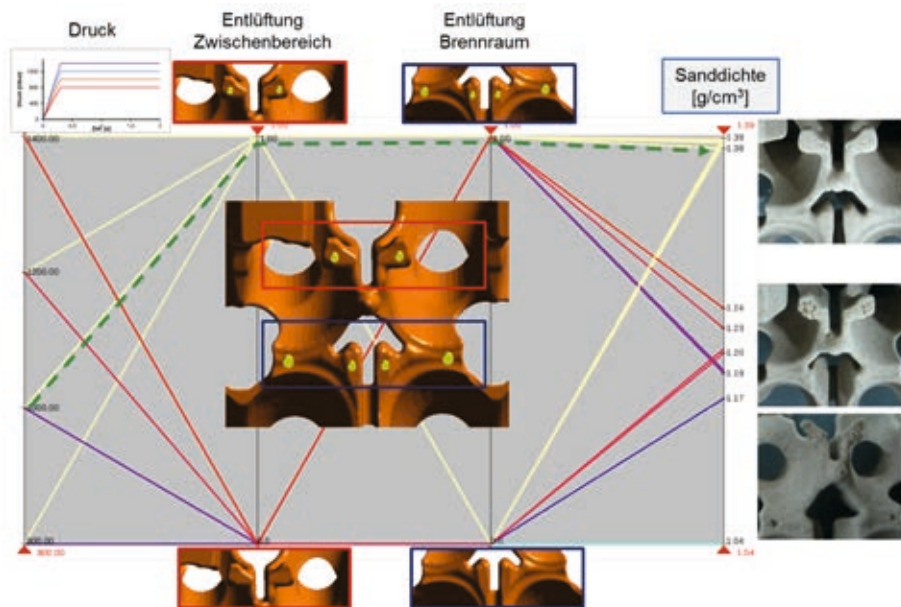
De enkelte simuleringresultater giver allerede vigtige indsigter. Fejlårsager kan identificeres, og gør det muligt at træffe særlige foranstaltninger for at løse problemet (figur 8). Alle design viser en lidt lavere kernesandtæthed i midten af de tyndvæggede sektioner. Det eksperimentelle forsøg viser, at denne mindre sandtæthed kan forbedres lidt ved at forøge skydetrykket. Ved at lukke for udluftningsdyserne i forbrændingskammertoppene bliver den lokale kernefortætning ens overalt i kernen. Kernens kvalitet er på dette tidspunkt nu i og for sig



Figur 8: a) Udsnit af kerne med karakteristiske sandfejl, b) simuleringsskemaet med angivelse af de automatisk kvantitativt evaluerede kerneområder samt c) simuleringresultater ved fire forskellige dyseplaceringer og ens skydetryk.

i orden. Men hvis alle udluftningsdyser anvendes opstår kernefejl under begasningen, da aktiv gas kan trænge ind gennem dyserne.

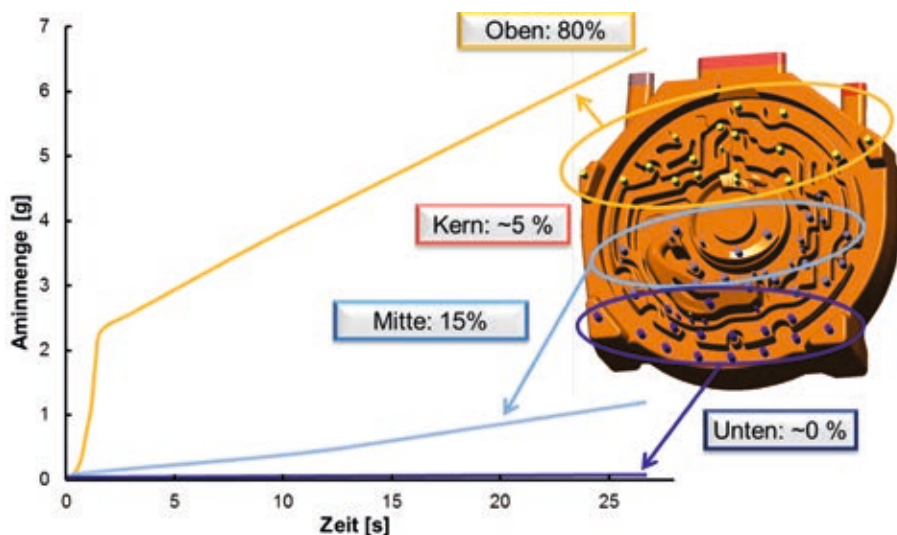
Dette gør, at sandet under forbrændingskammertoppene bliver skubbet væk. Lukningen af disse dyser forbedrer derfor kernens



Figur 9: Sandtæthed i det fejlbehæftede område som en funktion af de varierede parametre: I parallelkoordinatdiagrammet forbinder linjer af samme farve de forskellige procesparametre og de dertilhørende sandtætheder sammen. Lukning af udluftninger i forbrændingskammeret (blå linje) giver større sandtæthed, mens udluftninger skal være åbne i mellemsektionerne (rød) for at kunne opnå en god komprimering (gule linjer). Hvis forbrændingskammerets udluftninger er åbne medfører dette ofte begasningsfejl (billede nederst til højre).



Figur 10: a) Ventilhuskerne, som i bunden ikke er fuldstændigt afhærdet og b) efter optimering.



Figur 11: Kvantitativ aminbalance ved begasning ovenfra: Her bedømmes, hvor meget amin der forsvinder i de enkelte sektioner og dermed ikke mere kan bidrage til afhærdningen.

kvalitet. Kernerne bliver skudt op fuldstændigt og begasningsfejl bliver elimineret. Resultaterne viser også, at udluftning af mellemsektionerne er gavnlig for at opnå fuld sandtæthed (fig. 9).

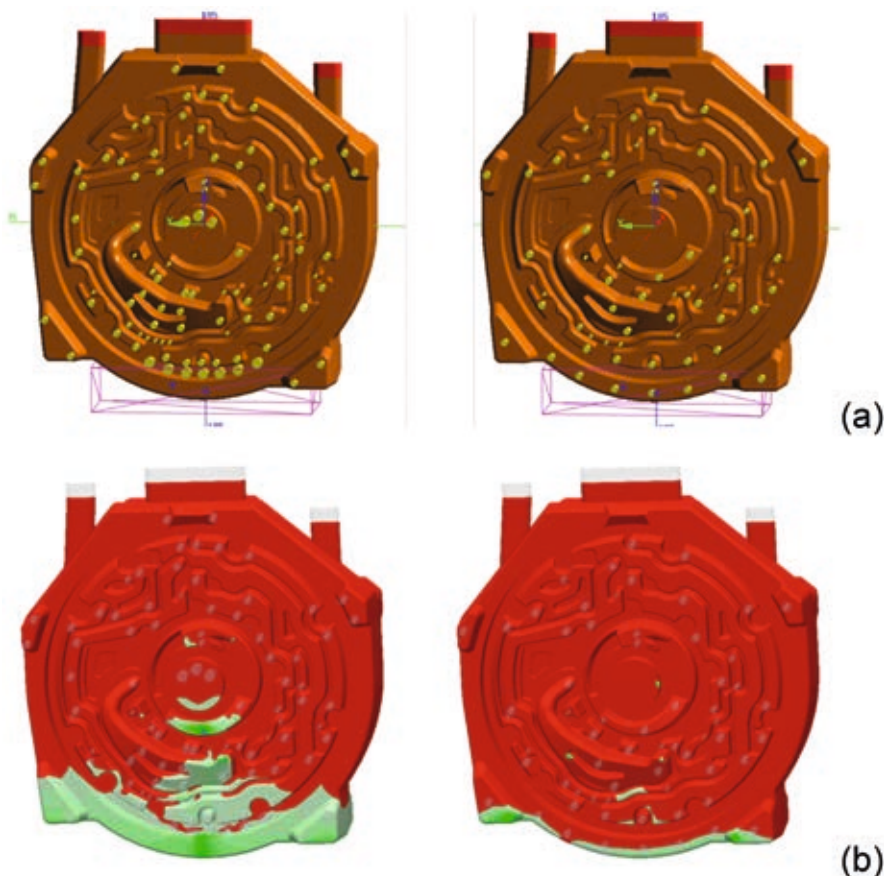
Evalueringen af det virtuelt eksperimentelle design førte til følgende:

1. De midterste udluftningsdyser bør lukkes, og
2. Udluftning af mellemsektioner burde foregå via lokaludluftning gennem værktøjets delefladen.

Fremgangsmåde ved begasningsoptimering af en coldbox-kerne

Til kernefremstilling findes kun i begrænset omfang udstyr til kvantitativ måling af begasningsprocessen. Selv hvis aminstrømmen i kernekassen ikke kan måles, giver begasningssimulationen kvantitative værdier, hvorved processen kan evalueres og virtuelt optimeres. Som et vigtigt mål fastlægges en høj begasningseffektivitet, hvor så lidt som mulig amin i den korteste tid kan komme i alle kernes kringelkroge.

Vertikalt delte kernekasser bliver normalt begasset ovenfra, hvilket kan give lange begasningsveje. Frihedsgraderne i kernekassen udgøres især af mulige udluftningsvariationer til at bringe ami-



Figur 12: Automatiseret evaluering af aminbegasning: a) diverse udluftningsvariationer vurderes på kvantitative kriterier, fx med hensyn til deres begasningseffekt; b) Vist i rødt er de områder, hvor en bestemt mængde aktivt bidrager til katalysen. Med et formindsket antal udluftningsdyser og placeringsændring i det nedre kritiske område (højre billede) strømmer amin videre i kernen og bliver der længere før den skylles ud.



Figur 13: Udviklingsforløbet ved design af en kernekasse (a til c): Grundlæggende mulige ændringer af kernegeometrien og dysetildeling (skydedyser rød, udluftningsdyser gul) for en produktionseget kernekasse kræver tidlig planlægning fra start til slut.

nen i kernekassens mest kritiske områder (fig. 10).

Den kvantitative evaluering af en enkel simulering viser bagasningsproblematikken (fig. 11). Ved anvendelse af skydedyser til begasning bliver en stor del af aminen på et tidligt tidspunkt skyllet ud af kernekassen (i dette tilfælde 80% i den øverste tredjedel). I den nederste del kommer der således næsten ingen amin. Uden ændring af værktøjet er det kun muligt, hvis overhoved, at opnå fuldstændig begasning, hvis aminmængden og begasningstiden forøges.

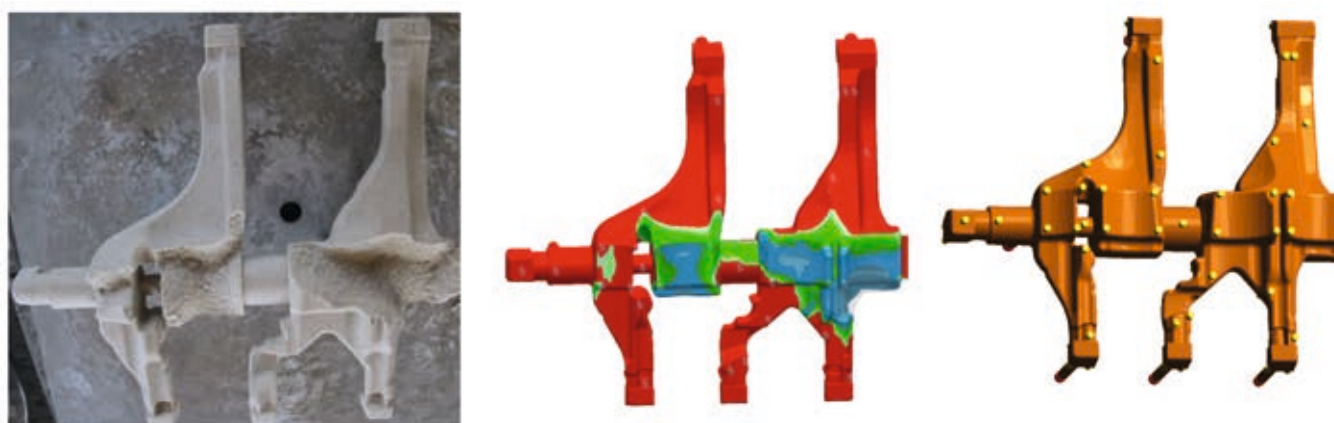
Ved hjælp af støberifagmandens erfaring kan udluftningssituationen systematisk ændres, og der opnås en effektiv afhærdning uden at selve kerneskydningen forringes. For at kunne fordele aminen igennem kernen, skal antallet af udluftninger fra top til

bund, i dette tilfælde, reduceres betydeligt. De forskellige variationsmuligheder kan nemt undersøges i et virtuelt eksperimentelt design, idet de enkelte varianter derefter automatisk bliver sammenlignet og vurderet kvantitativt.

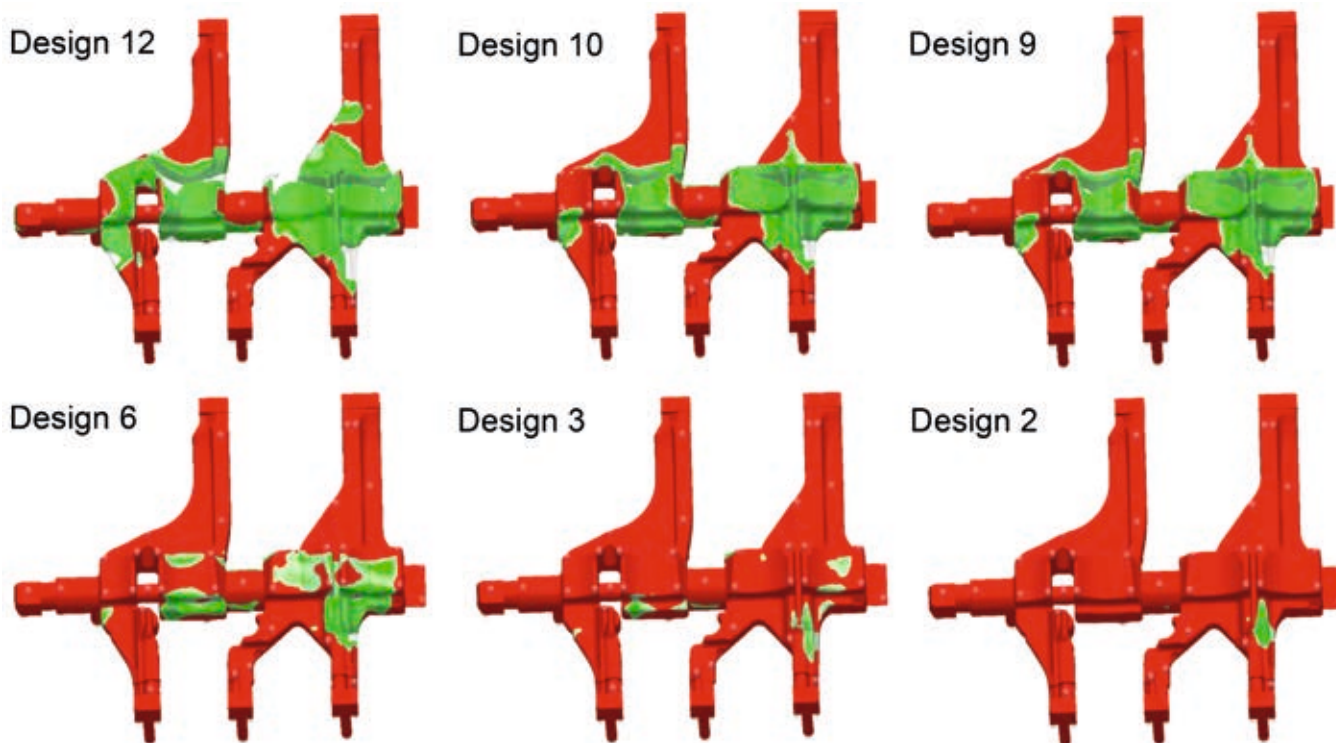
Aminbegasningen er en dynamisk proces, hvor den doserede amin først strømmer ind i kernekassen og derefter, svarende til dysernes konfiguration og procesparametre, skylles ud igen. Simuleringsresultaterne gør det muligt at følge aminflowets tidsforløb. Desuden vurderes, hvor meget amin der findes i hver enkelt keredel under hele processen. Disse kriterier tillader en kvantitativ sammenligning af de forskellige variationsmuligheder og en tilsvarende evaluering af begasningseffektiviteten (figur 12). Den oprindelige version har i

sammenligning med den optimerede version 40% mindre amin i det kritiske kerneområde. Samtidigt giver et mindre antal udluftningsdyser under de samme begasningsbetingelser et fire gange større modtryk i kernen. Derved forbliver aminen i den optimerede variant signifikant længere i kernekassen og katalyserer således hærdeningen mere effektivt.

Begasnings- og strømningssituationerne i horisontalt delte kernekassen er grundlæggende anderledes. For flade kerner er det især et spørgsmål om kernens placering under skydehoved og placering af skydedyserne (fig. 13). Strømningen gennem kernen viser en stærk lokal placeringsafhængighed af begasnings- og udluftningsdyser såvel som kernens lokale vægtykkelsesvariation. Derfor har placeringen af de individuelle begasnings- eller



Figur 14: a) virkelig og b) simuleret kernefejl anvendes som udgangssituation for c) den virtuelle optimering - frihedsgrader for orientering af strømningen i kernens uafhærdede sektioner er placering af udluftningsdyser (gule rør), og dysens udformning.



Figur 15: Simuleringsresultater af det virtuelt eksperimentelle design: begasningseffektivitetens optimerings-tendenser er hurtigt fundet og foranstaltninger til procesoptimering kan defineres nøjagtigt. Billederne viser de lokale maksimale aminkoncentrationer for de forskellige beregningsmetoder (a til f).

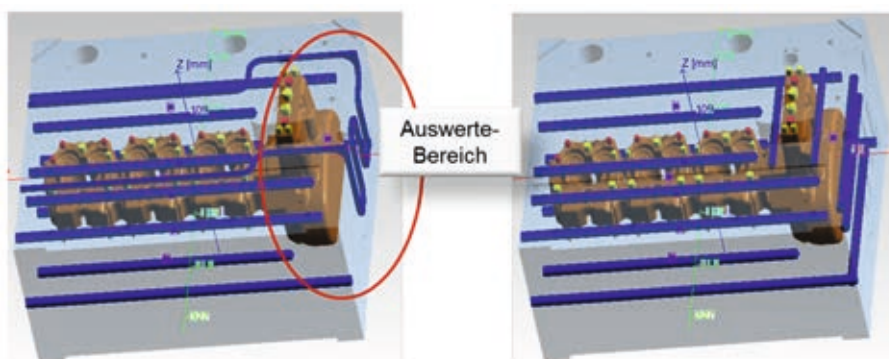
udluftningsdyser en betydelig indvirkning på begasningseffektiviteten. Vurderingen af den aktuelle situation ved en enkel simulering er et godt udgangspunkt for en systematisk optimering (figur 14). Støberifagmanden fastlægger derefter frihedsgrader til positionsændring af de enkelte dyser eller typeændring af udluftningsdyserne. Målsætninger er at for-

bedre strømretningen for således at kunne begasse kernen bedre. I en virtuel forsøgsprøvning kan begasningsparametre såsom tryk eller amintypen testes for deres effektivitet samtidigt. Et statistisk sikret eksperimentelt design med fx 12 variationer er på grund af den manglende spredning af proces tilstanden tilstrækkeligt for at kunne opnå de fastlagte mål og at

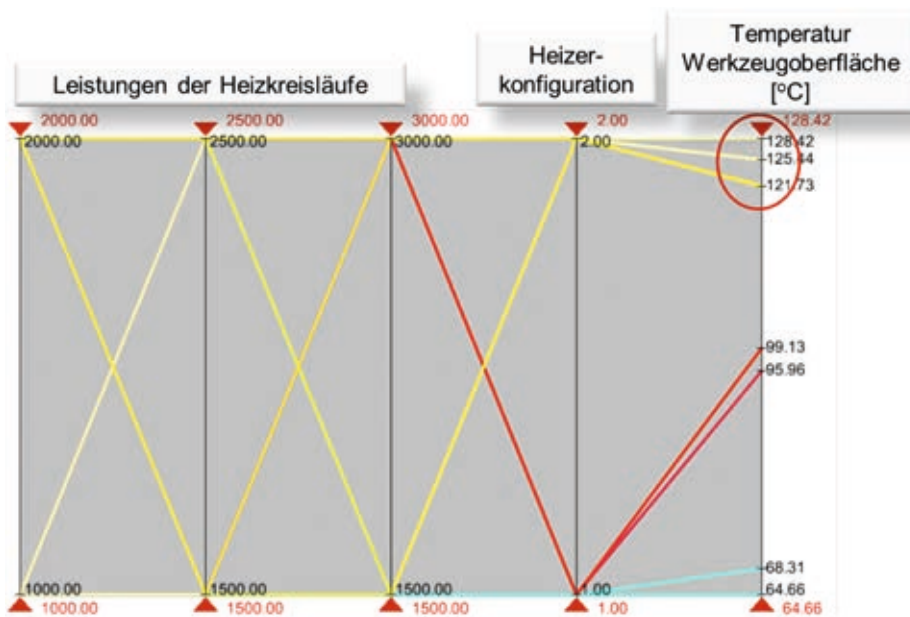
kunne definere foranstaltninger for den praktiske gennemførelse (figur 15).

Varmeteknisk optimeret kernefremstillingsværktøj til varmeafhærdende kernefremstilling

Det termiske design af kernekasser til varmeafhærdende kernefremstillingsmetoder såsom Hotbox, Skalform eller uorganisk varmeafhærdende bindere kan være en temmelig vanskelig opgave. Kernens geometri og lokale vægtykkelser kræver i visse kerneområder en temperaturjustering for at sikre en reproducerbar afhærdning. Ved seriefremstilling skal den korrekte temperaturfordeling i kernekassen kunne opretholdes permanent. Denne opgave stiller store krav til støberifagmanden. På den ene side er mulighederne for anvendelse af varmelegemer ofte begrænset af placeringsmulighederne i eller de tekniske krav til kernekassen. På



Figur 16: Med det oprindelige design af varmelegemer og anvendelse af en varmespiral i kernekassens tykke sektioner (a) kunne det ønskede temperaturprofil ikke opnås. Optimeringen udføres ved en automatiseret simulering med procestypiske frihedsgrader, såsom udskiftning af varmespiralen (b) og ændring af varmeeffekten



Figur 17: Temperaturniveauet i kritisk evalueringsområde som en funktion af varmelegemekonfiguration og varmeeffekt: Med varmelegemekonfiguration 2 kan den ønskede temperaturer med forskellige varmekapaciteter fastholdes pålideligt (gule linjer).

den anden side kan kernekassen have mange tværsnitsændringer og varierende vægtykkelser. Derfor kan det være vanskeligt, også for en erfaren støberifagmand, at forudsige, hvordan temperaturen i de forskellige dele af kernekassen vil være under kontinuerlig drift. Uden forudgående forsøg kan man ikke pålideligt vurdere og sikre, hvor effektivt de forskellige opvarmningskilder kan opretholde den korrekte temperatur i kernekassen.

Simulering og virtuel optimering er også et effektivt værktøj til designet af opvarmede kernekasser. Udgående fra det oprindelige design giver en enkelt simulering en detaljeret indsigt i temperaturforholdene i kernekassen ved kontinuerlig drift. Fra simuleringen udleder støberifagmanden forskellige designvarianter for at eliminere fejlfuldsomme kerneområder. Sædvanligvis er målet opretholdelse af en ensartet temperatur i kernekassen. Vigtige frihedsgrader er varmekildens geometri, placering og dimensioner. For kernekasser med oliekanaler er vigtige frihedsgrader strømningsvejene

gennem kernekassen og i givet fald variationer i kanaldiameter. Ved anvendelse af elektriske varmpatroner er det position, geometri og effekt samt opbygningen af reguleringskredsløbet. Styring ved hjælp af termoelementer er en anden frihedsgrad, da ensartet opvarmning påvirkes af termoelementers placering.

I et simpelt praktisk eksempel vises, at i et kritisk tykvægget område af en kerne, der er fremstillet med et uorganisk varmeafhædet bindemiddel, er temperaturen for sikker afhærdning for lav. De anvendte varmespiraler skal erstattes af en anden varmekilde (figur 16). Formålet med det virtuelt eksperimentelle design er at indstille en tilstrækkelig høj temperatur, der varierer kun lidt ved seriefremstilling. Frihedsgrader er variationer i selve varmekilden, i dette tilfælde de elektriske varmelegemer, og varmekildens effekt. Andre frihedsgrader kunne være placeringsændringer af termoelementer. En forsøgsplan med 16 design giver allerede et klart indblik i de foranstaltninger, der skal gennemføres (figur 17). Med den

nye opvarmningskonfiguration kan der med forskellige varmeeffekter opnås pålidelige driftstemperaturer fra 120 °C til 130 °C.

Med denne metode kan også komplekse kernekasser med fx 50 varmelegemer systematisk analyseres og optimeres. Om hele værktøjet eller kun uafhængige sektioner skal optimeres afhænger i så fald af selve kernekassen udformning og de krav, der stilles til opvarmningen.

Fremtidsperspektiv

Virtuelle eksperimenter og autonom optimering af kernefremstilling er en banebrydende metode til at designe optimale og robuste værktøjer gennem transparente processer og kvantitativ procesforståelse. De erfaringer der opnås kan føre til nødvendige procesændringer i eget støberi og gør det muligt at reagere fleksibelt på kundernes krav. Med de viste innovative metoder kan de enkelte processimuleringer på basis af tidligere identificerede mål og frihedsgrader automatisk gennemføres og vurderes som virtuelle eksperimenter. Støberifagmanden kan fokusere på en vurdering af simuleringresultaterne og får et sikkert beslutningsgrundlag.

Litteratur

- 1) Wagner I., Schneider M.: Kernsimulation – Mit Kernkompetenz in die Zukunft. GIESSEREI 96 (2009), Nr. 12
- 2) Sturm J.C., Wagner I.: Praktischer Einsatz der Kernsimulation zur Prozessoptimierung. GIESSEREI 100 (2013), Nr. 4
- 3) Bramann H., Pavlak L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozesssimulation. GIESSEREI 102 (2015), Nr. 2
- 4) Hahn I., Sturm J.C.: Von der Simulation zur gießtechnischen Optimierung. GIESSEREI 102 (2015), Nr. 6

Oversat for STØBERIET af Herbert Wolthoorn