

Tutorial
**Simulation des Füllvorganges
für ein RTM-Paddel**

M. Henne, G. A. Barandun

Rapperswil, 12.04.2010

Rev. 2.0

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick.....	3
2	Programm installieren und starten	4
3	Bauteilgeometrie vorbereiten	5
3.1	Import der Bauteilgeometrie	5
3.2	Netz aufbereiten.....	5
4	Bauteileigenschaften und Randbedingungen zuweisen	8
5	Simulation und Optimierung durchführen und auswerten	12
6	Race tracking.....	15
7	Speichern von Füllbildern.....	18
8	Erweiterte Einstellungen	20

RTM-Paddel

1 Überblick

myRTM ist ein sehr einfach zu bedienendes Programm, das bei der Auslegung von Harzinjektionsprozessen (Resin Transfer Molding, RTM) angewendet wird. Die Software wurde am IWK entwickelt und basiert auf dem Prinzip der zellulären Automaten¹ (ZA). John Neumann, Stanislaw Ulam und Alan Turing wendeten das Prinzip erstmals 1940 in Los Alamos an. ZA können für räumlich begrenzte, zeitabhängige Systeme eingesetzt werden – der Zustand einer Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt dabei vom eigenen Zustand sowie demjenigen der Nachbarzellen zum vorangehenden Zeitschritt ab.

In diesem Tutorial lernen Sie, mit der Simulationssoftware „myRTM“ umzugehen. Dies umfasst die Installation, den Import eines Bauteils sowie die Entwicklung von Injektionsstrategien für dieses Bauteil.

Hinweise: Bedienungs- und Bildelemente sind *kursiv* geschrieben.
 Bezeichnungen von Dateien/Namen sind „in Anführungszeichen“ geschrieben

¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Zellulare_Automaten

RTM-Paddel

2 Programm installieren und starten

Die Installation ist denkbar einfach: kopieren Sie den Ordner „myRTM“ auf Ihre lokale Festplatte, z. B. auf den Desktop. Öffnen Sie den Ordner und doppelklicken Sie das Programm „RTMSimulator.exe“ (Abbildung 1). Wichtig: Entfernen Sie keine der ebenfalls im Ordner vorhandenen Dateien!



Abbildung 1: myRTM-Ordner

myRTM besteht aus einer Anzeigefläche für die Simulation (links) sowie zwei bzw. drei Registern, um verschiedene Einstellungen vorzunehmen bzw. Resultate anzuzeigen (Abbildung 2). Das Register *Advanced* (rechts) wird über das Menü *Settings* aktiviert. Die Register haben folgende Funktionen:

- *Preprocessing*: Erfassen der Material- und Prozessdaten
- *Simulation*: Durchführen der eigentlichen Simulation
- *Advanced*: Ändern und Anzeigen der Berechnungsparameter

(Siehe "FPCM10_Paper_Cellular_Automates.pdf" von Prof. Dr. Markus Henne und Dr. Gion A. Barandun)

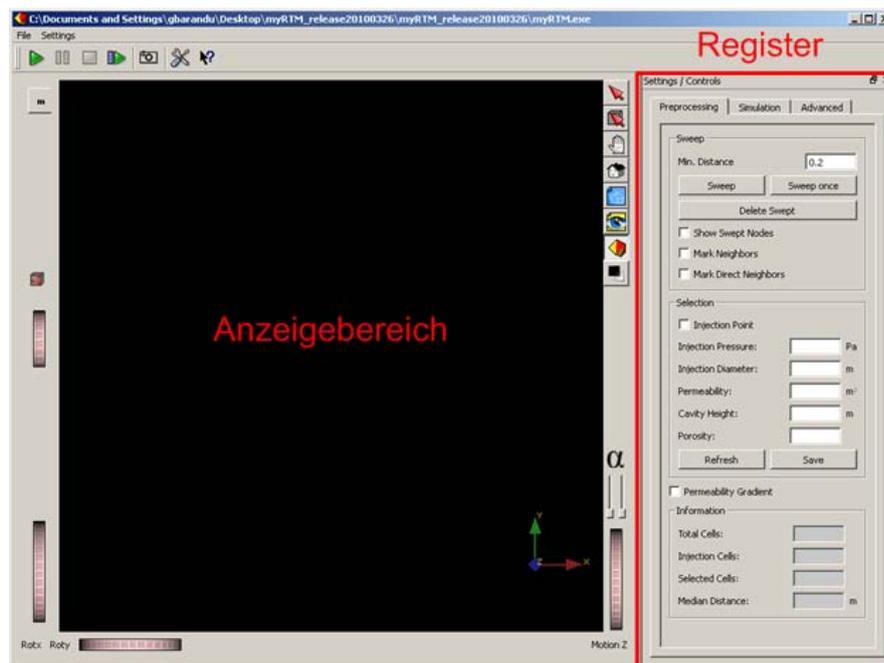


Abbildung 2: myRTM nach dem Start

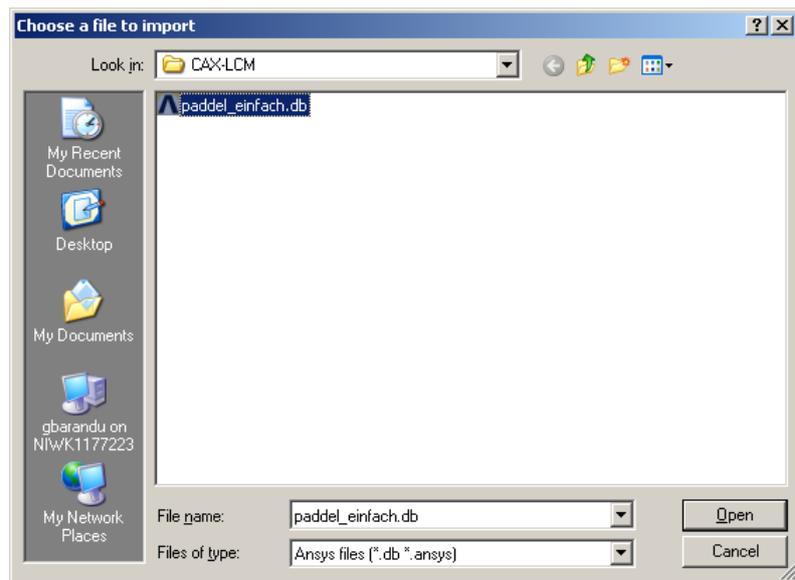
3 Bauteilgeometrie vorbereiten

3.1 Import der Bauteilgeometrie

Der Import der Bauteilgeometrie erfolgt entweder aus einem CAD-System (vorangehender Export als *igs-Datei) oder aus einem FE-Programm (z.B. Ansys, *db-Datei). myRTM verfügt über einen integrierten Mesher (Gmsh¹), der einfachere Geometrien (1 Fläche, schalenartige Bauteile) vernetzen kann. Bei komplexeren Geometrien mit mehreren Flächen empfiehlt es sich, ein separates FE-Programm für die Vernetzung zu verwenden.

In diesem Fall soll die Geometrie des Wildwasser-Paddels verwendet werden. Es handelt sich dabei um ein relativ komplexes Bauteil (hohler Schaft, zulaufende Paddelflächen), weswegen die Vernetzung bereits in Ansys vorgenommen wurde.

Um eine Geometrie oder ein FE-Netz zu importieren, wählt man im Menü *File* den Eintrag *Open File*. Im folgenden Dialogfeld wird die Paddel-Geometrie aus Ansys (db-file) „paddel_einfach.db“ ausgewählt und mit Klick auf *Open* importiert.



Hinweis: Je nach Importformat muss zwischen Meter und Millimeter umgeschaltet werden. Dies geschieht (nach dem Öffnen) mit der Schaltfläche *m* (bzw. *mm*) oben links an der Anzeigefläche.

3.2 Netz aufbereiten

Nach dem Import erscheint das Paddel im Hauptfenster von myRTM (Abbildung 3). Für die Anwendung der zellulären Automaten ist ein möglichst homogenes Netz Voraussetzung. Deshalb müssen als erstes ggf. überflüssige Zellen (=Knoten) entfernt werden. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, gibt es bei der Paddel-Geometrie im Übergangsbereich zwischen Schaft und Fläche sowie an der Spitze der Fläche Zonen mit einer Knotenanhäufung. Die Bereinigung der Knoten geschieht mit dem dem *Sweep*-Befehl in der gleichnamigen Box.

¹ <http://geuz.org/gmsh/>

RTM-Paddel

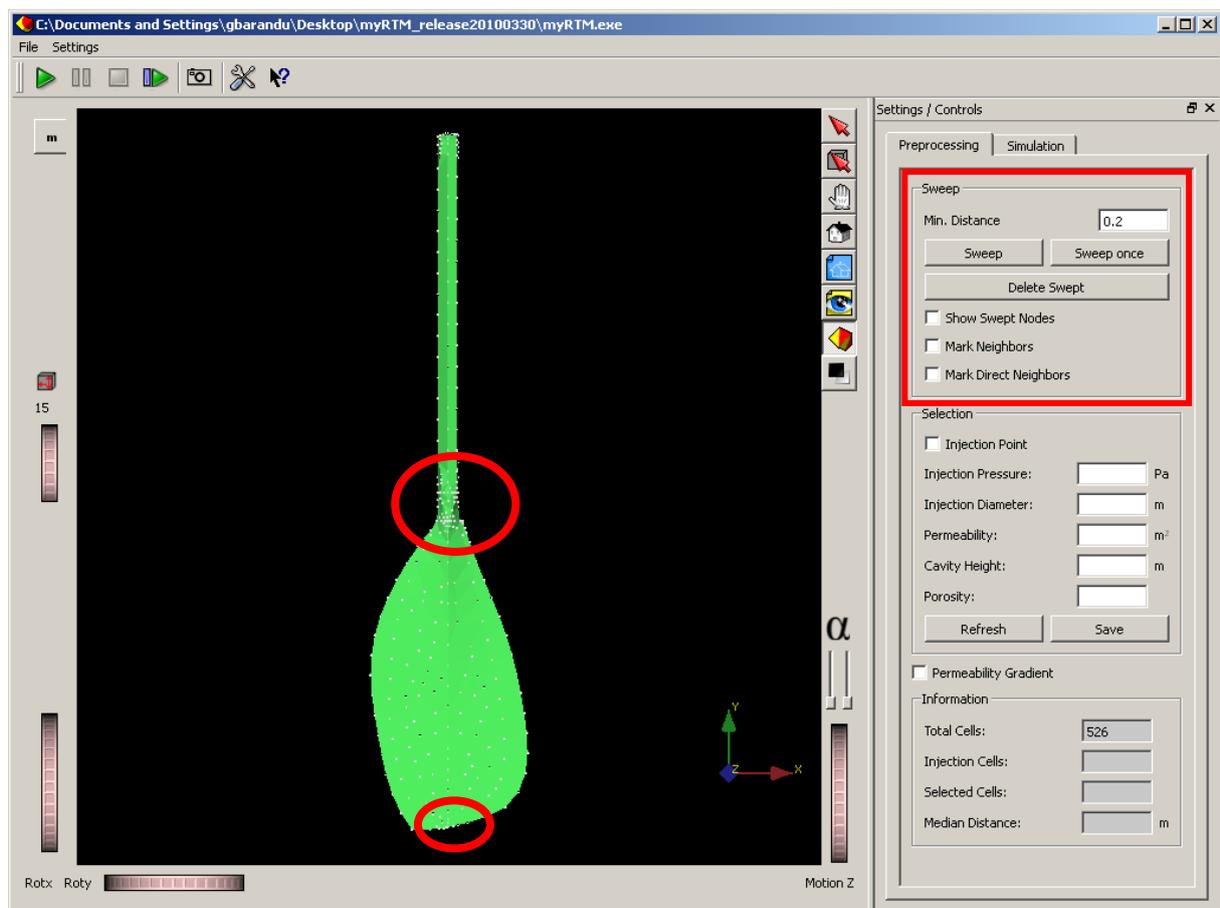


Abbildung 3: Paddel-Geometrie nach dem Import

Tragen Sie im Feld *Min. Distance* den Wert *0.4* ein (Abbildung 4). Das bedeutet, dass alle Knoten, die weniger als 40% der mittleren Distanz der Knoten von ihrem Nachbarn entfernt sind, gelöscht werden. Nach einem Klick auf *Sweep* werden alle betroffenen Knoten blau markiert.

Hinweise: Der Wert 0.4 für die minimal Distanz ist für diesen Fall optimal, kann aber in anderen Fällen durchaus variieren. Spielen Sie mit dem Wert, indem Sie andere Zahlen zwischen 0.2 und 0.5 einsetzen (erneut auf *Sweep* klicken). Auf diese Weise können Sie die Netzgüte beeinflussen.

Löschen Sie schliesslich die so identifizierten überflüssigen Zellen mit Klick auf *Delete swept*. Damit erhalten Sie ein homogenes, für die Simulation geeignetes Netz.

RTM-Paddel

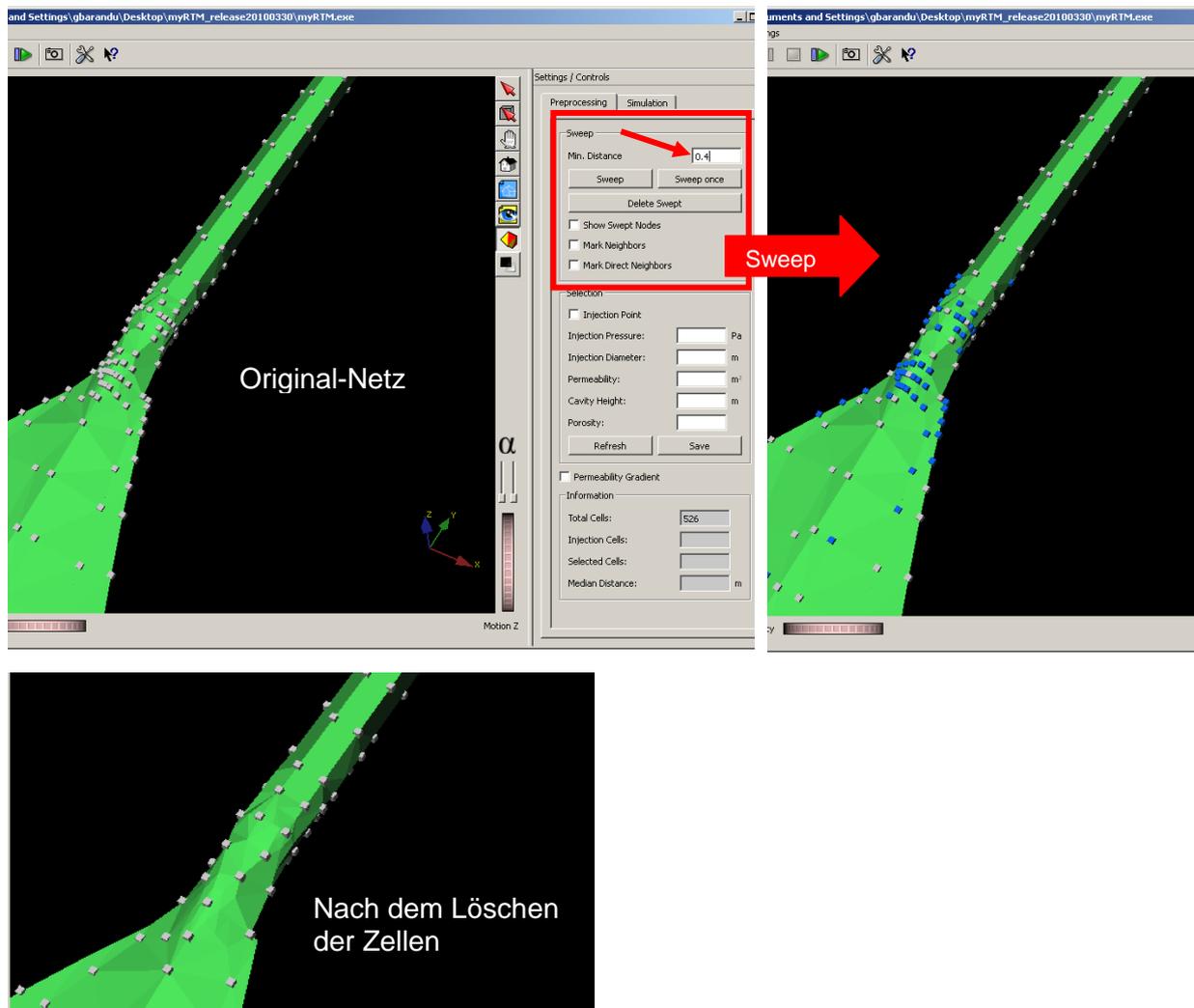


Abbildung 4: Sweep der überflüssigen Zellen

RTM-Paddel

4 Bauteileigenschaften und Randbedingungen zuweisen

Nachdem die Geometrie aufbereitet wurde, müssen alle für den Prozess relevanten Eigenschaften zugewiesen oder erfasst werden. Es geht dabei um:

- Die Permeabilität des Fasermaterials (Durchlässigkeit des verwendeten Gewebes)
- Die Porosität (Anteil „Leerraum“ im Verhältnis zum Gesamtvolumen der Kavität)
- Die Bauteildicke (es können verschiedene Bereiche erfasst werden)
- Angusspositionen, Durchmesser der Angüsse und verwendeter Angussdruck
- Verwendeter Vakuum-Unterdruck (meist ca. 10'000 Pa \approx 0.1 bar)
- Viskosität (Fließwiderstand) des verwendeten Harzsystems

Für das Paddel werden die folgenden Werte verwendet:

Tabelle 1: Prozessparameter

Bezeichnung	Kurzzeichen	Wert	Einheit
Permeabilität	K	2E-9	[m ²]
Porosität	Φ	0.5	[-]
Vakuum	p_{vac}	1'000	[Pa]
Viskosität	η	0.1	[Pas]
Injektionsdruck	p_{inj}	500'000	[Pa]
Faservolumengehalt	φ	50	[%]
Dicke Schaft (Wand) ¹	t_1	1.5	[mm]
Dicke Paddelfläche	t_2	2.0	[mm]
Durchmesser Injektionspunkt	d	10	[mm]

Als erstes werden die richtigen Werte für Permeabilität, Dicke und Porosität eingegeben:

Klicken Sie auf das Auswahlsymbol  in der Palette rechts vom Anzeigebereich. Markieren Sie nun die gesamte Paddelgeometrie, indem Sie mit dem Auswahlsymbol Punkte rund um das Paddel markieren und mittels Doppelklick die Auswahl beenden (der Auswahlpfad wird automatisch geschlossen, Abbildung 5).

¹ Der Schaft des Paddels ist hohl. Die Dicke bezieht sich auf die Wandstärke des „Rohrs“.

RTM-Paddel

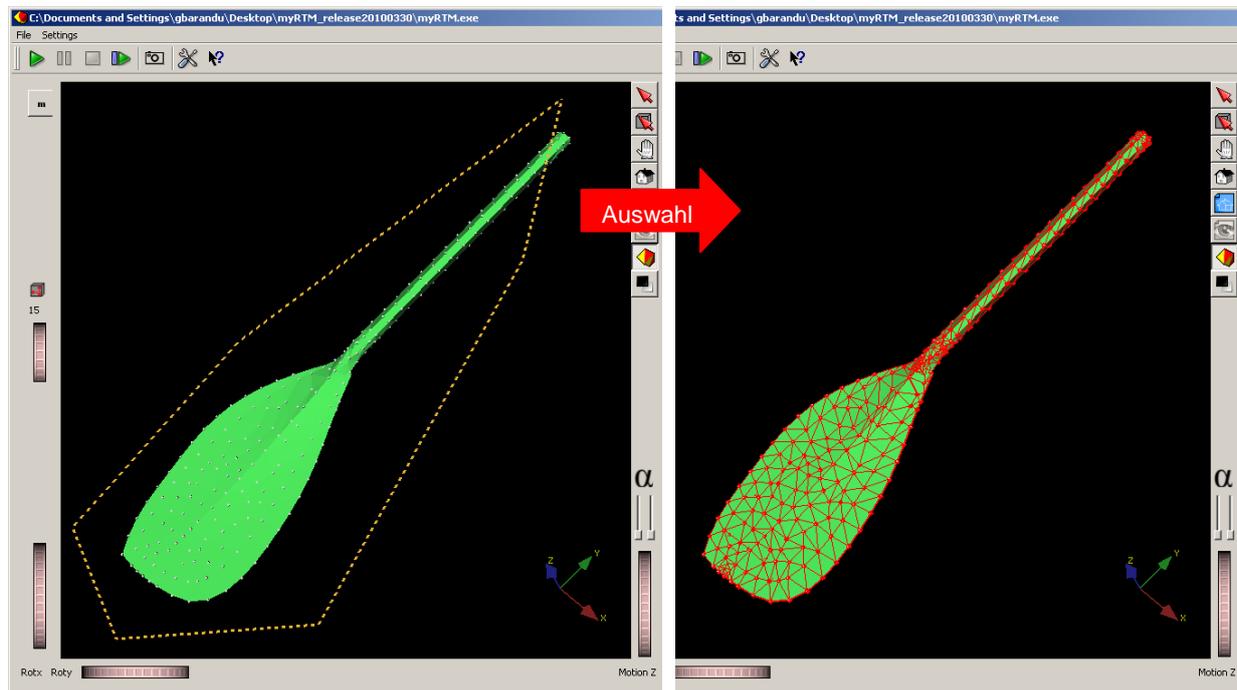


Abbildung 5: Auswählen der Paddel-Geometrie

In der Box *Selection* werden nun die Werte für Permeabilität, Dicke und Porosität des ausgewählten Bereiches eingegeben. Mit Klick auf *Save* werden diese zugewiesen.

Da sich der Wert für die Dicke der Paddelfläche vom Wert für den Schaft unterscheidet, muss nun noch eine Anpassung vorgenommen werden:

Wählen Sie dazu nur die Paddelfläche aus und weisen Sie dieser (bei sonst unveränderten Werten) eine Dicke von 2 mm zu (Abbildung 6).

Selection	
<input type="checkbox"/>	Injection Point
Injection Pressure:	500000 Pa
Injection Diameter:	0.01 m
Permeability:	2e-09 m ²
Cavity Height:	0.0015 m
Porosity:	0.5
<input type="button" value="Refresh"/> <input type="button" value="Save"/>	

RTM-Paddel

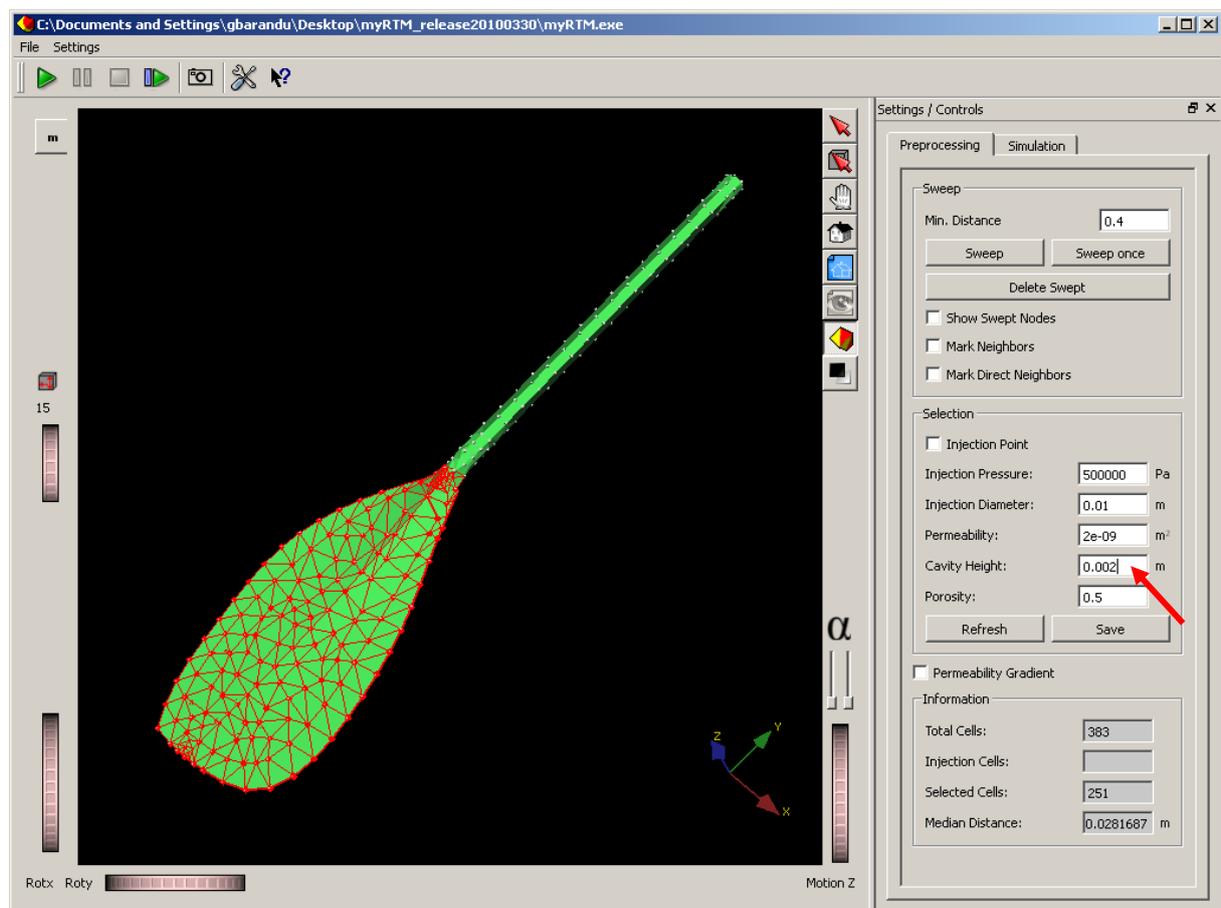


Abbildung 6: Auswahl der Paddelfläche und ändern des Werts für die Dicke

Nun fehlt noch die Position des Angusses für eine erste Simulation. Wählen Sie dafür das obere Schaftende aus. Dort soll ein Anguss mit 5 bar Injektionsdruck positioniert werden. Achten Sie darauf, dass Sie alle Knoten auf der Aussenfläche des Schaftes auswählen, aber nur die erste Reihe. Am besten bewegen Sie das Paddel so im Fenster, dass nur noch das Schaftende in einer Ebene parallel zur y-Achse sichtbar ist (Abbildung 7).

In der Box *Selection* werden nun die Daten für Injektionsdruck (*Injection Pressure*, 5 bar entsprechend 500'000 Pa) und *Injection Diameter* (0.01 m) eingetragen (Abbildung 7). Mit Klick auf *Save* werden die Einstellungen gespeichert.

Hinweise: Die Angüsse werden farblich hervorgehoben.
 Der Durchmesser eines Angussknoten kann nicht grösser als der Zellabstand (hier: ca. 0.03 m, angezeigt im Feld *Median Distance* im *Information*-Rahmen) sein. Im vorliegenden Fall wird von einer parallelen Injektion rund um den Schaft ausgegangen. Wählen Sie alternativ nur einen Knoten aus, und prüfen Sie den Einfluss auf die Simulation.

RTM-Paddel

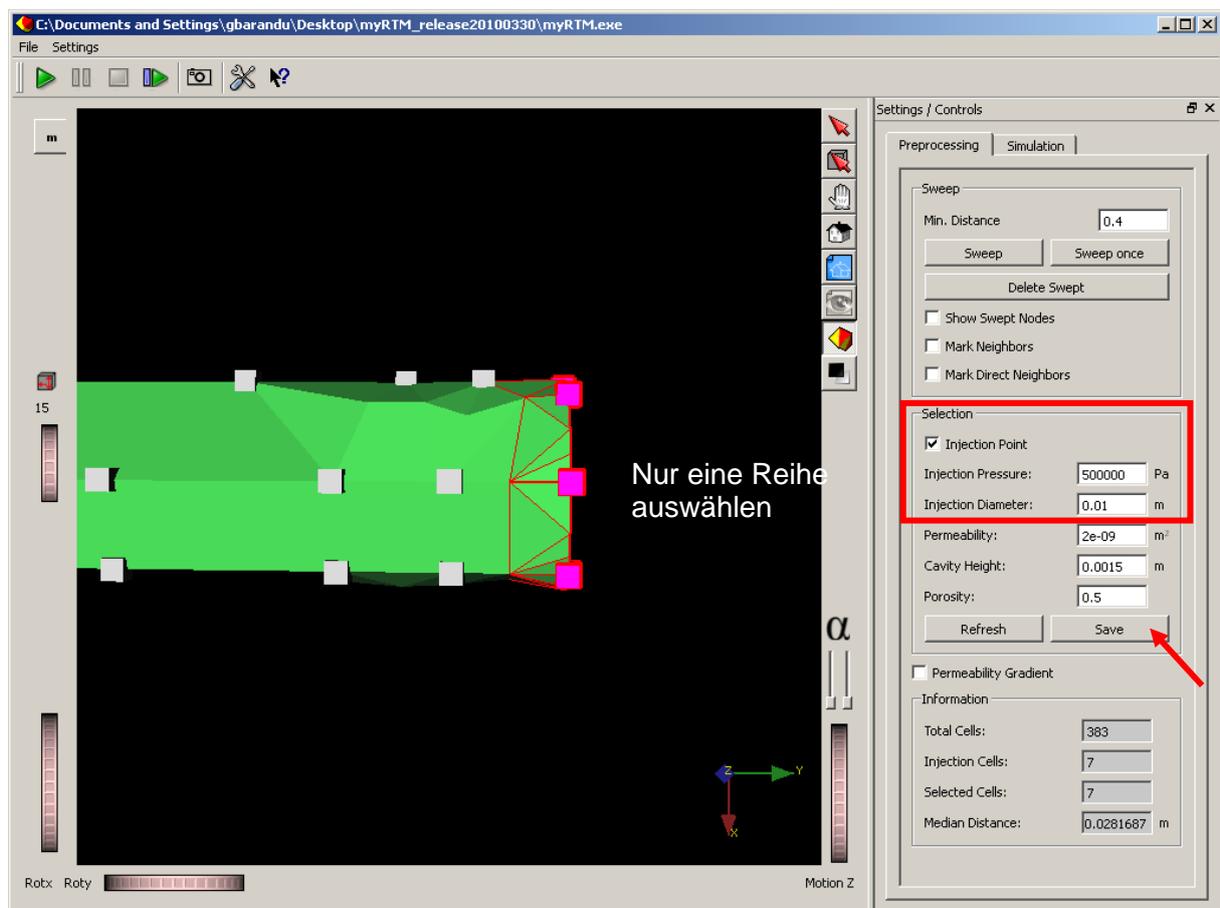


Abbildung 7: Definieren des Angusspunkts

Damit wurden alle Einstellungen vorgenommen, die zum Start der Simulation nötig sind. An dieser Stelle ist es nie verkehrt, den Zwischenstand abzuspeichern. myRTM verfügt über ein eigenes Dateiformat, bei dem Geometrie und Randbedingungen abgespeichert werden.

Wählen Sie den Befehl *Save To File* aus dem Menü *File*. Benennen Sie im Speichern-Dialogfeld (Abbildung 8) Ihre Simulation möglichst treffend und kontrollieren Sie die Dateierdung (*.rtms).

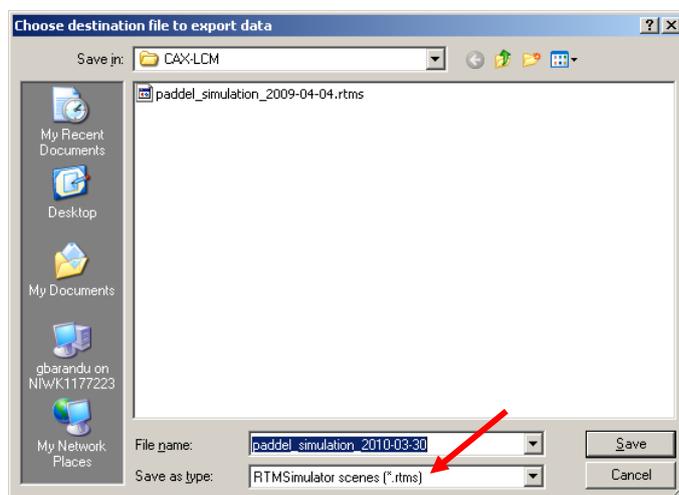


Abbildung 8: Simulation speichern

RTM-Paddel

5 Simulation und Optimierung durchführen und auswerten

Nachdem alle Einstellungen gemacht sind, wechseln Sie ins Register *Simulation*. Achten Sie darauf, dass möglichst das ganze Paddel im Anzeigebereich sichtbar ist. Passen Sie die Werte in der *Process Parameters* an, und zwar für *Vacuum Pressure* (ändern auf 1'000 Pa) und *Viscosity* (ändern auf 0.1 Pa s).

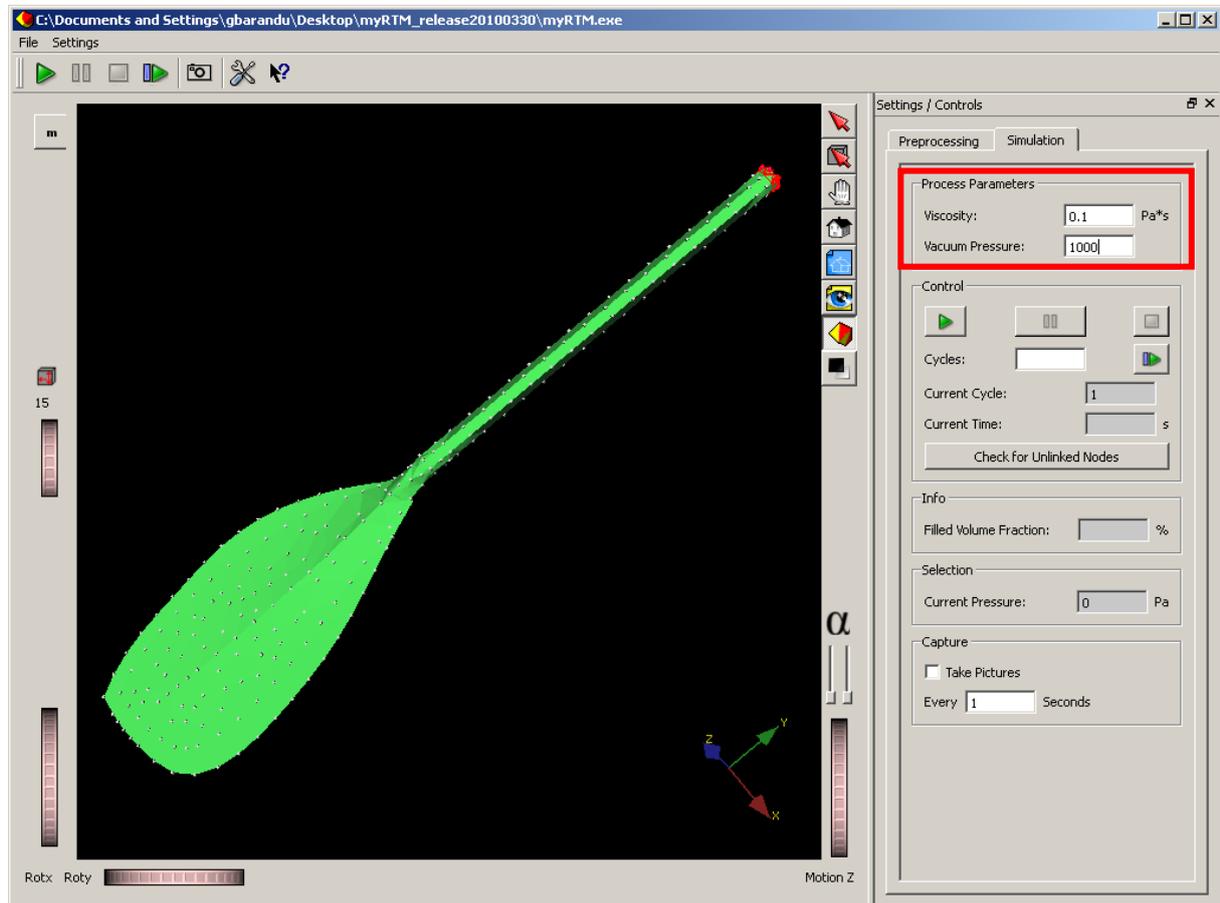


Abbildung 9: Viskosität und Vakuum anpassen

Die Simulation wird mit den Tasten in der Box *Control* gesteuert. Durch Drücken der Play-Taste  beginnt die Simulation. Es besteht jederzeit die Möglichkeit, die Simulation anzuhalten () , Änderungen vorzunehmen (z. B. zusätzliche Angüsse definieren) und die Simulation durch Klick auf die Play-Taste weiter laufen zu lassen.

In der Box *Control* wird auch angegeben, welche Füllzeit bis zum angezeigten Füllgrad bereits vergangen ist. Wie bei allen RTM-Simulationen ist diese Angabe mit Vorsicht zu genießen, da sehr viele Einflussfaktoren die Füllzeit erheblich beeinflussen können. Wesentlich aussagekräftiger ist die Darstellung des Füllgrads in Abhängigkeit des relativen Zeitindex (Füllzeit = 100% rel. Zeitindex). Zum Vergleich mehrerer Simulationen wird aber trotzdem häufig die absolute Zeit herangezogen, da auf diese Weise eine Aussage gemacht werden kann, wie stark die Füllung z. B. durch zusätzliche Angüsse beschleunigt wird.

Führen Sie als erstes eine Simulation des kompletten Füllvorgangs durch. Drücken Sie auf die Play-Taste und warten Sie, bis das Bauteil komplett gefüllt wird. Der mit Harz imprägnierte Bereich wird rot dargestellt, die Fließfront in einem etwas helleren Rot-Ton.

RTM-Paddel

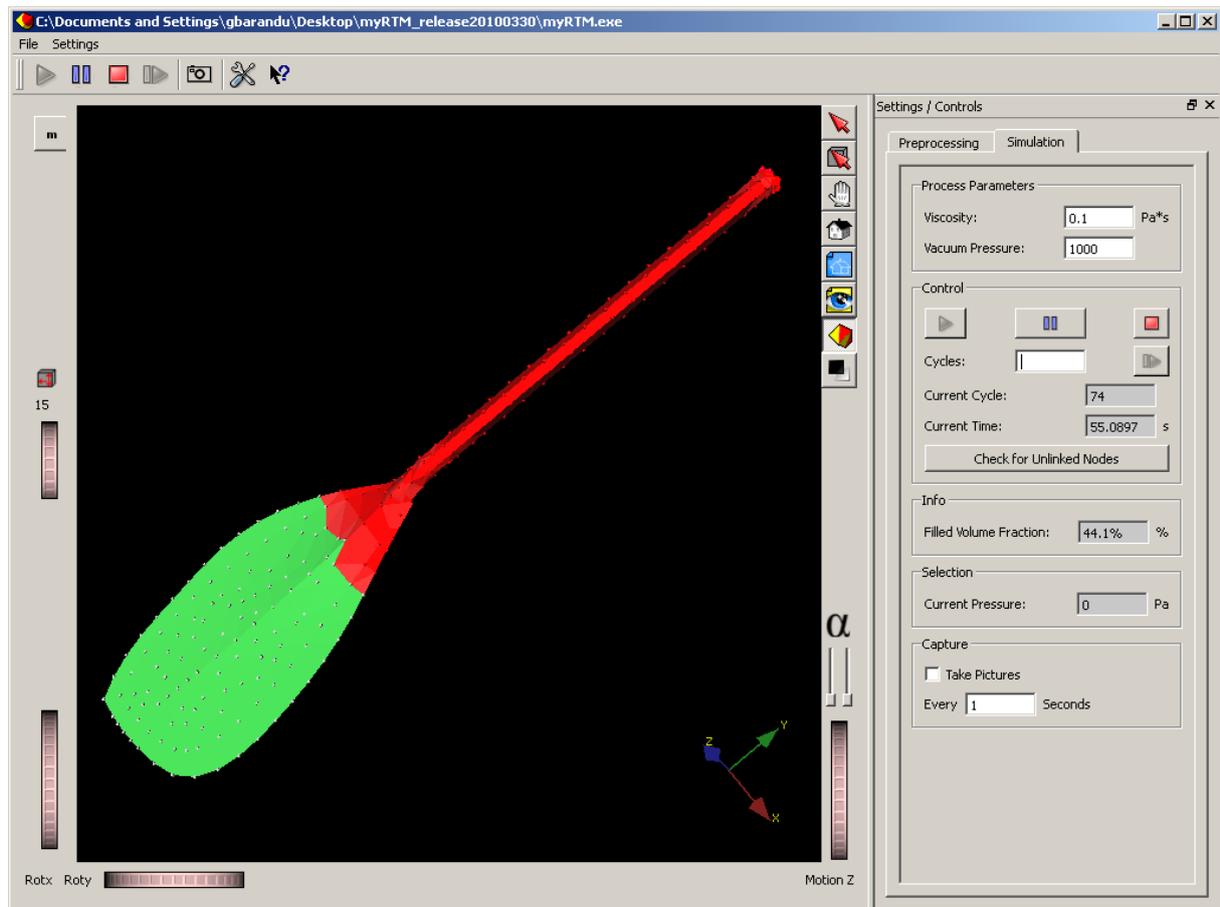


Abbildung 10: Simulation

Stoppen Sie die Simulation mit Druck auf die Stopp-Taste . Sie gelangen wieder an den Beginn der Simulation (Paddel wird grün). Starten Sie die Simulation erneut und unterbrechen Sie an einem beliebigen Punkt durch Drücken der Pause-Taste . Im Rahmen *Info* (Abbildung 10) können Sie u. a. den Füllgrad (*Filled Volume Fraction*) ablesen, der zusammen mit der Füllzeit den Füllvorgang beschreibt. Die Füllzeit wird im Rahmen *Control* angezeigt (*Current Time*). Um Fehler zu vermeiden, sollte sie immer relativ zur gesamten Füllzeit gesetzt werden (Relative Füllzeit in % vs. Füllgrad in %). Erstellen Sie ein entsprechendes Excel-Diagramm mit relativer Füllung (Abbildung 11).

Totale Füllzeit 211 s

Füllzeit s	Füllzeit %	Füllgrad %
0	0.00%	0
10	4.74%	18
39	18.48%	35
75	35.55%	53
133	63.03%	73
187	88.63%	92
211	100.00%	100

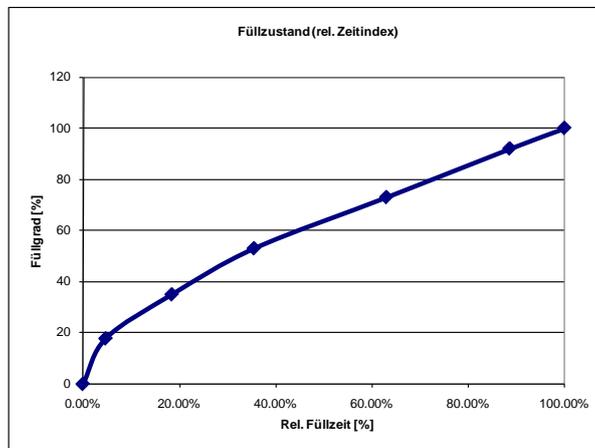


Abbildung 11: Excel-Diagramm zum Füllgrad

RTM-Paddel

Da ein hochreaktives Harzsystem zum Einsatz kommt (das sehr schnell aushärtet und somit schnell eine Viskosität erreicht, mit der nicht mehr injiziert werden kann), soll nun soll der Füllvorgang beschleunigt werden. Eine Möglichkeit ist das Platzieren eines zusätzlichen Angusses, der von Anfang an aktiv ist, was aber die Gefahr von Lufteinschlüssen und unerwünschten Zusammenflusszonen erhöht. Eine meist bessere Alternative ist eine Kaskadeninjektion, bei der ein zweiter (dritter, vierter, ...) Anguss aktiviert wird, kurz bevor die Harzfließfront ihn erreicht.

Simulieren Sie den Füllvorgang für eine Kaskadeninjektion. Gehen Sie dabei wie folgt vor:

- Starten Sie mit den gleichen Randbedingungen und dem gleichen Anguss wie oben
- Stoppen Sie die Simulation zu einem beliebigen Zeitpunkt
- Definieren Sie einen zusätzlichen Anguss unmittelbar an der Harzfließfront
- Setzen Sie die Simulation fort
- Vergleichen Sie die Injektionszeiten der ursprünglichen und der optimierten Simulation und stellen Sie beide im Excel-Diagramm dar (Abbildung 12). Beziehen Sie die relative Füllzeit auf diejenige der Originalsimulation.

Totale Füllzeit 99 s

Füllzeit s	Füllzeit %	Füllgrad %
0	0.00%	0
10	4.74%	18
30	14.22%	32
48	22.75%	66
64	30.33%	80
88	41.71%	96
99	46.92%	100

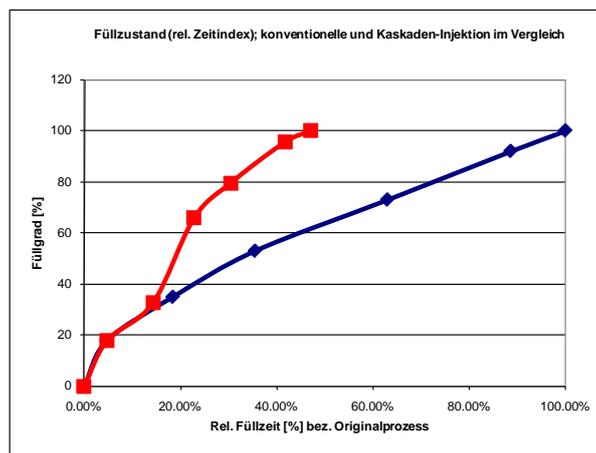


Abbildung 12: Gegenüberstellung der normalen und der Kaskaden-Injektion

6 Race tracking

Unter dem Begriff „race tracking“ versteht man Zonen sehr hoher Permeabilität (sog. „runner“), die sich typischerweise (ungewollt) am Rand der Faserverstärkung beim Einlegen oder Schliessen der Form bilden. Häufig reichen die Fasern nicht ganz bis zum Formrand (ungenauer Zuschnitt, mangelhaftes Preforming, unzureichende Genauigkeit beim Einlegen) oder werden durch das Schliessen des Werkzeugs verschoben. Daneben kann es auch innerhalb der Faserverstärkung (T-Stösse, Radian) zu race tracking kommen. Obwohl solche runner meist sehr klein sind, haben sie erheblichen Einfluss auf das Füllbild und können, falls sie in der Simulation nicht berücksichtigt wurden, ein Bauteil unbrauchbar machen. Deshalb ist es wichtig, bereits in der Prozessauslegung zu überlegen, wo runner auftreten könnten und welche Auswirkung sie auf den Füllvorgang haben. Da das Auftreten von race tracking an einer bestimmten Stelle meist zufällig ist, weil z. B. die Preformingqualität von Bauteil zu Bauteil variieren kann, platziert man manchmal absichtlich einen runner, um die Füllung gezielt zu beeinflussen.

Beim Paddel tritt im Randbereich der Paddelfläche race tracking auf. Ändern Sie die Permeabilität in dieser Zone um zwei Grössenordnungen. Wählen Sie dazu die beiden äussersten Knotenreihen aus und weisen Sie ihnen eine Permeabilität von $2e-7 \text{ m}^2$ zu (Abbildung 13).

Hinweise: Bei konventionellen FE-Simulationen wird die Permeabilität normalerweise um eine Grössenordnung für eine ungefähr den realen Abmessung des race tracking-Bereiches entsprechenden Zone erhöht. Bei der Paddelsimulation mittels ZA wäre dazu eine feinere Vernetzung notwendig.

Die Rechenzeit erhöht sich nach der Einführung der race tracking-Zonen erheblich. Eine feinere Vernetzung würde diesen Effekt noch verstärken. Je grösser die Unterschiede in der Permeabilität sind, umso länger dauert die Rechenzeit. Bei einer groben Vernetzung ist es deshalb sinnvoller, einem etwas breiteren Randbereich eine leicht erhöhte Permeabilität zuzuweisen, statt nur den Randknoten eine stark erhöhte Permeabilität.

Wiederholen Sie nun die vorherige Simulation und beachten Sie die Veränderung in Füllmuster und Injektionszeit (Abbildung 14). Achten Sie auch darauf, wo das Harz am Ende der Füllung zusammenfliesst und ob sich dort eine Entlüftung platzieren lässt (Abbildung 15).

Überlegen Sie, ob allenfalls weitere race tracking-Zonen auftreten könnten oder ob sich solche gezielt platzieren liessen, um den Prozess weiter zu beschleunigen.

RTM-Paddel

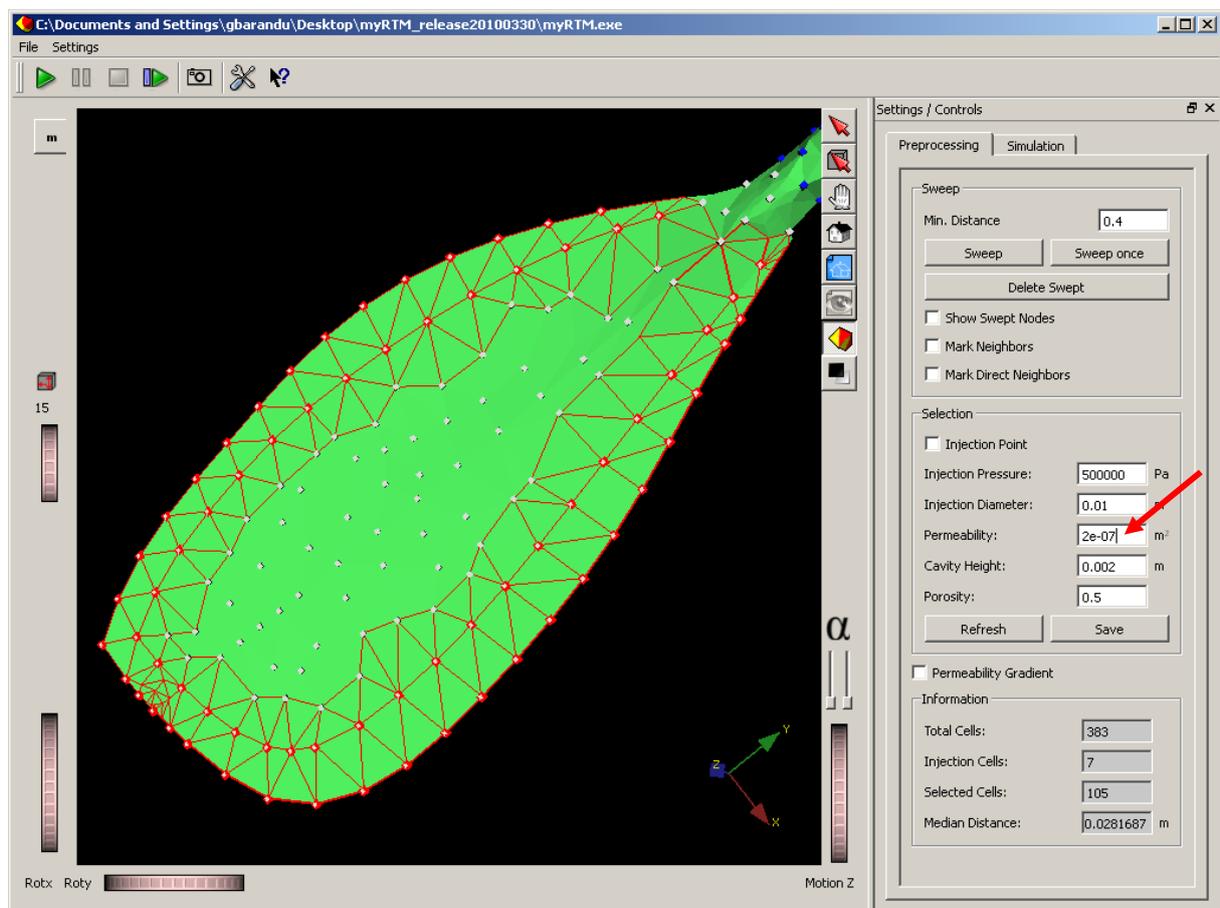
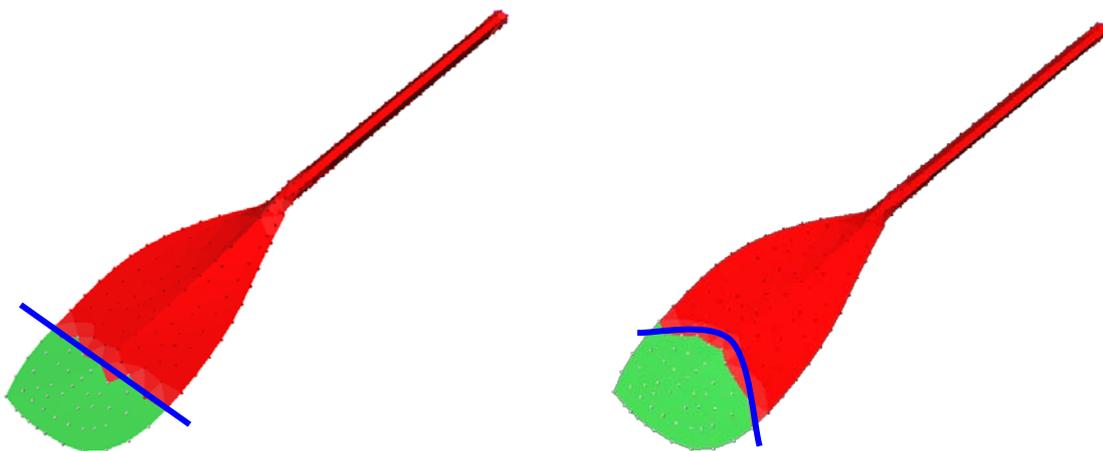


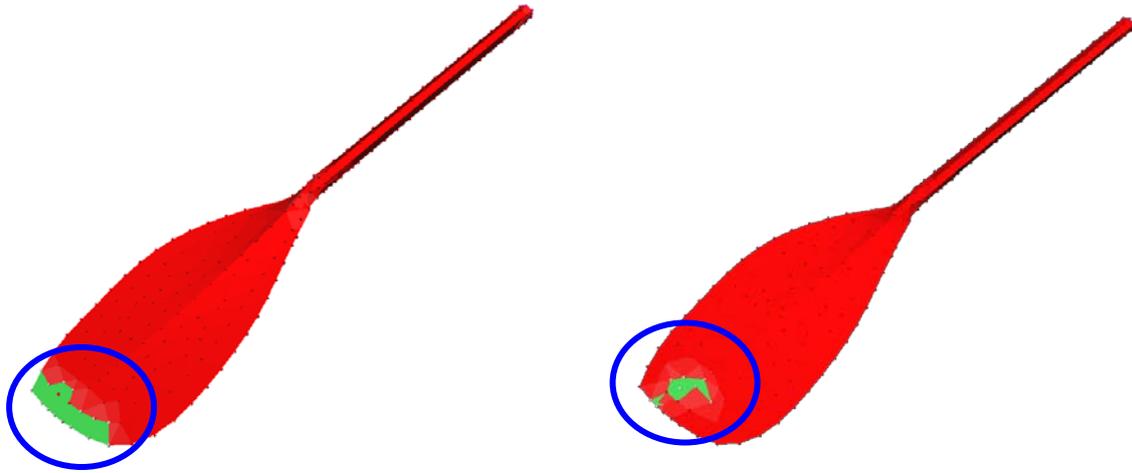
Abbildung 13: race tracking am Rand der Paddelfläche



Simulation ohne race tracking, 160s

Simulation mit race tracking, 153s

Abbildung 14: Einfluss des race tracking auf das Füllmuster



Simulationsende ohne race tracking

Simulationsende mit race tracking

Abbildung 15: Problematische Platzierung der Entlüftung mit race tracking

RTM-Paddel

7 Speichern von Füllbildern

Um die Resultate zu dokumentieren, werden häufig Füllbilder verwendet, die in bestimmten Abständen gespeichert werden. Dazu ist es meist besser, wenn der Hintergrund weiss (statt schwarz) dargestellt wird.

Klicken Sie auf den schwarz/weiss-Umschalter  in der Palette rechts des Anzeigefensters. Stellen Sie in der Box *Capture* ein Intervall ein, in dessen Abständen Momentaufnahmen der Füllung gespeichert werden sollen und aktivieren Sie die Markierung *Take Pictures* (Abbildung 16). Starten Sie nun eine Simulation und wechseln Sie nach Beendigung ins myRTM-Verzeichnis, wo die Bilder (im png-Format) gespeichert werden. Der Dateiname enthält die Zeit in Sekunden als erste Zahl nach „Scene_“ (Abbildung 17).

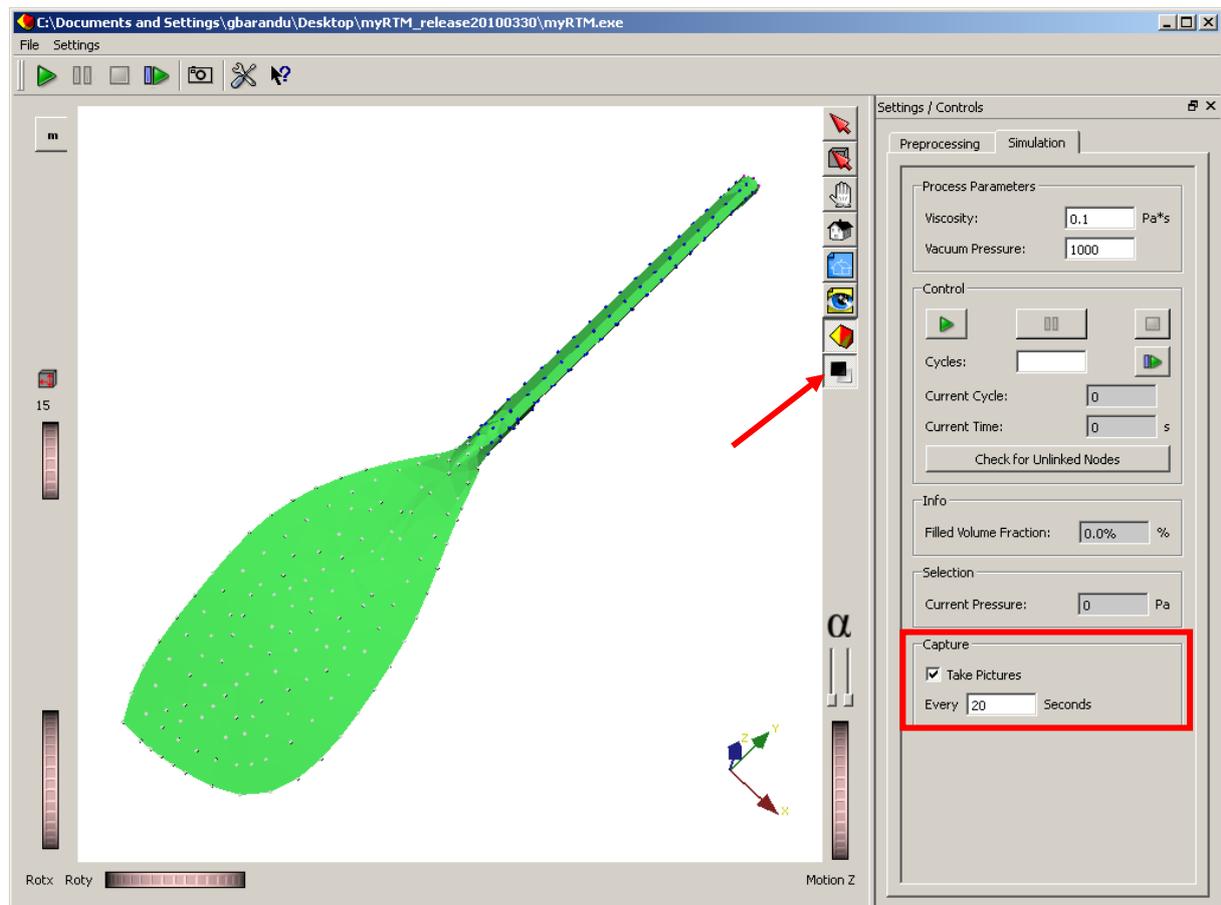


Abbildung 16: Einstellungen für den Bildexport

RTM-Paddel

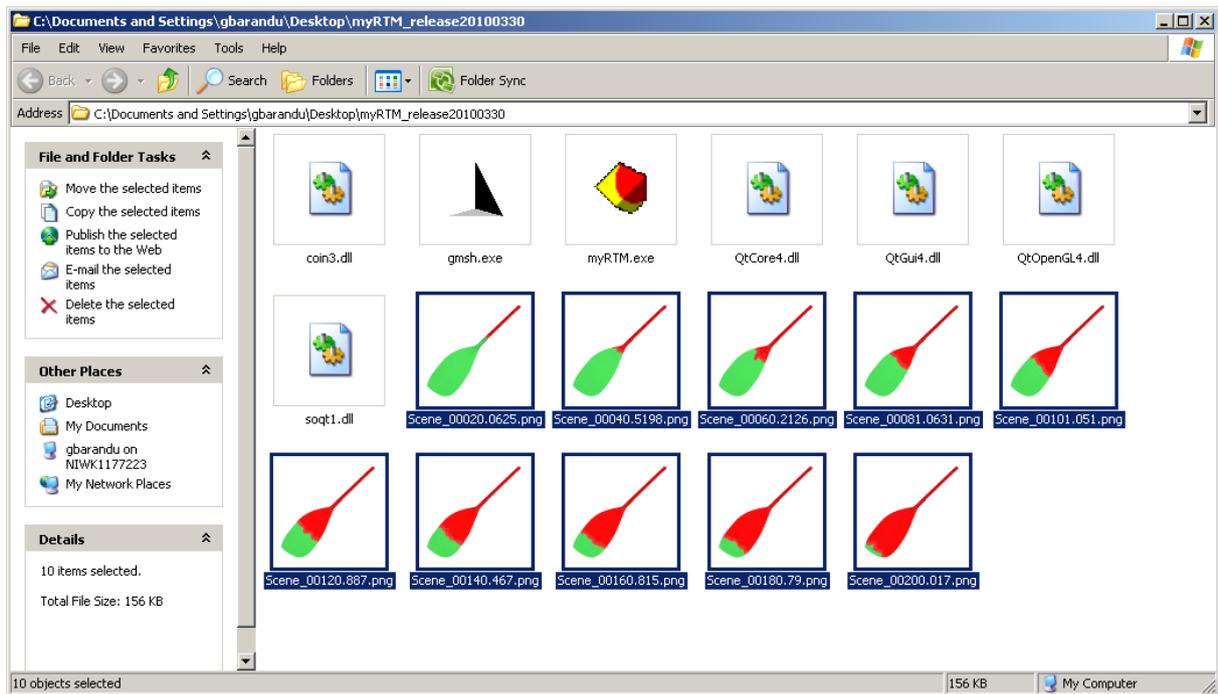


Abbildung 17: Exportierte Bilder aus myRTM

RTM-Paddel

8 Erweiterte Einstellungen

Die Berechnung der Füllfront basiert auf einem Algorithmus, der in der beigefügten Publikation beschrieben wird. Obwohl es grundsätzlich nicht empfohlen wird, kann der Benutzer die der Formel zu Grunde liegenden Parameter anpassen, was im Register *Advanced* passiert. Dieses muss wie eingangs erwähnt zuerst über das Menü *Settings* aktiviert werden.

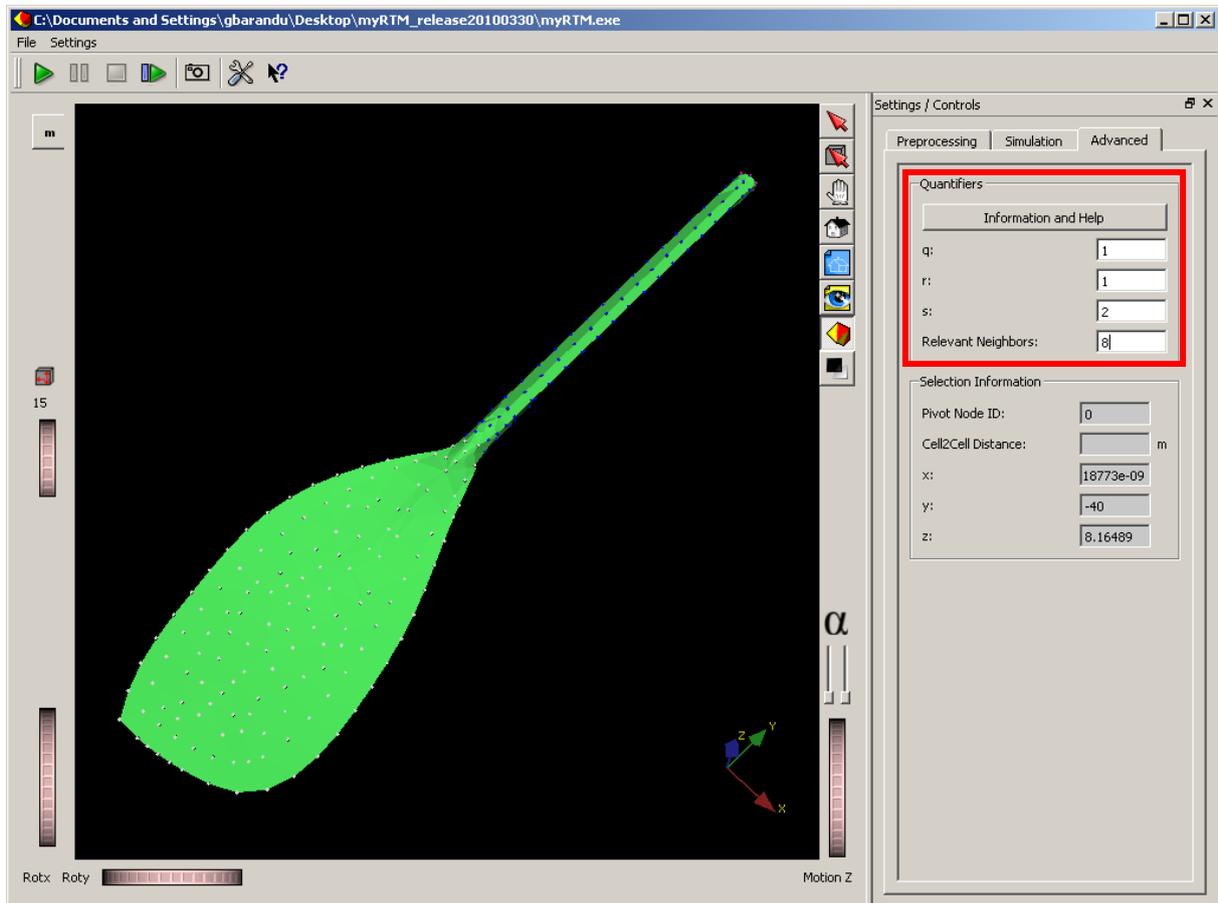


Abbildung 18: Erweiterte Einstellungen mit Formelparametern