

Masterthesis

Intelligente Strukturoptimierung: Übertragung des
Physarum-polycephalum-Algorithmus auf die Spannungsanalyse von
Plattentragwerken

eingereicht von:

Lisa Vatterodt

Matrikelnummer: 382819

Konstruktionsbionik

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

betreut durch:

Prof. Dr. H.-J. Weber

Schweinfurt, der 16. August 2025

Abstrakt

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung eines bionischen Algorithmus basierend auf dem Verhalten des Schleimpilzes *Physarum polycephalum* zur intelligenten Struktur-optimierung von Plattentragwerken im Stahlbetonbau. Ziel ist es, durch die Übertragung natürlicher Selbstorganisationsprozesse auf die Berechnung und Visualisierung von Kraftflüssen innerhalb von Stahlbetondecken einen innovativen Ansatz zur materialeffizienten Bewehrungsverlegung zu schaffen.

Im ersten Schritt wird die statische Analyse der Plattentragwerke mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dabei kommen die Grundlagen der Mindlin-Plattentheorie sowie die Bestimmung der Hauptspannungen und der zugehörigen Hauptspannungsrichtungen zum Einsatz. Die so gewonnenen Werte dienen als Basis für die Simulation des Kraftflusses in der Platte.

Im Zentrum der Arbeit steht die Implementierung des *Physarum-polycephalum*-Algorithmus mit Hilfe eines partikelbasierten Netzwerkmodells, das die natürlichen Musterbildungs- und Adaptionsmechanismen des Schleimpilzes nachbildet. Hierbei werden Partikel eingesetzt, die sich unter Berücksichtigung von Chemoattraktantenkonzentrationen bewegen und mittels einfacher sensorischer Regeln selbstorganisierte Netzwerke bilden. Als Reize fungieren in der Simulation sowohl die Lagerpunkte der Platte als auch die Trajektorien der Hauptmomente aus der FEM-Berechnung. Die Simulation erfolgt iterativ, wobei das Netzwerk durch Verstärkung der Hauptpfade optimiert wird, bis ein stabiler Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass das partikelbasierte Modell in der Lage ist, die Kraftflusslinien der Platte adaptiv abzubilden und dabei eine Netzstruktur zu generieren, die sich signifikant von den herkömmlichen, orthogonalen Bewehrungsrastern unterscheidet. Dadurch kann eine gezielte Bewehrungsverlegung entlang der tatsächlichen Spannungsverläufe realisiert werden, was zu einer besseren Materialausnutzung, geringeren Stahlmengen und einer erhöhten Tragfähigkeit führt.

Darüber hinaus wird die hohe Flexibilität des Ansatzes hervorgehoben, der auch komplexe Plattentragwerke mit variierenden Randbedingungen und Lastfällen robust abbilden kann. Dies eröffnet Perspektiven für eine ressourcenschonende und nachhaltige Bauweise im konstruktiven Ingenieurbau.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hinweise verwendet.

Schweinfurt, der 16. August 2025



Lisa Vatterodt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung	3
3	Aktueller Stand der Technik	5
3.1	Plattentragwerke im Bauwesen	5
3.2	Grundlagen der Finite-Elemente-Methode	7
3.3	Berechnung der Hauptbemessungswerte	15
3.4	Deckenbemessung	16
4	Schleimpilz-Algorithmus	19
4.1	Schleimpilze	19
4.1.1	Plasmaströmung	21
4.1.2	Bewegungsmechanismen	22
4.1.3	Chemotaxis	23
4.1.4	Suchverhalten	24
4.2	Schleimpilzsimulation	25
4.2.1	Partikel	26
4.2.2	Digitale Petrischale	29
4.2.3	Modellmechanismen der Musterbildung ohne Stimuli	31
4.2.4	Modellmechanismen der Musterbildung mit vordefinierten Stimuli	34
4.3	Musterbildung als Berechnungsgrundlage	38
5	Methodik	39
5.1	Ablaufschema	40
5.1.1	Verwendete Software	40
5.2	Plattenberechnung	41
5.2.1	Abmessungen und Randbedingung	41
5.2.2	Lasten	42
5.2.3	FE-Analyse	43
5.2.4	Ergebniswertkonvertierung	46
5.3	Physarum-polycephalum-Algorithmus	48
5.3.1	Implementierung der Deckenberechnung	48

Inhaltsverzeichnis

5.3.2	Implementierung des Partikelmodells	52
5.3.3	Modellvalidierung	56
6	Plattenanalyse	59
6.1	Modellkonfiguration und Parameterwahl	59
6.2	Ergebnisse	63
7	Schlussbetrachtung und Ausblick	67
	Symbolverzeichnis	71
	Abbildungsverzeichnis	73
	Tabellenverzeichnis	77
	Literaturverzeichnis	77
	Digitaler Anhang	83

1 Einleitung

Die Entwicklung von Überlebensstrategien in der Natur basiert häufig auf dezentralen, selbstorganisierten Prozessen, die zu einer bemerkenswerten Musterbildung führen. Besonders deutlich wird dieses Phänomen in großen, individuenbasierten Populationen, deren Einheiten unabhängig voneinander agieren und lediglich auf niedriger Ebene miteinander interagieren. Die Musterbildung ist hierbei das Resultat globaler Verhaltensweisen, welche sich aus der Summe der individuellen Handlungen ergeben. Diese Prinzipien der Selbstorganisation sind jedoch keineswegs auf die Populationsebene beschränkt, sondern lassen sich ebenso auf zellulärer Ebene beobachten. Innerhalb lebender Systeme tragen Musterbildungsmechanismen wesentlich zur Entwicklung, Anpassung und Aufrechterhaltung des Gesamtorganismus bei. Die entstehenden Strukturen und Verhaltensmuster erfüllen dabei vielfältige Funktionen, etwa bei der Fortbewegung, der effizienten Nahrungssuche, dem Transport von Substanzen oder dem Wachstum. Zudem ermöglichen sie eine flexible Reaktion an wechselnde Umweltbedingungen oder veränderte Bedürfnisse des Organismus, um eine optimale Anpassung zu gewährleisten.

Das Erreichen eines optimalen Zustands erfolgt im biologischen Kontext häufig durch adaptives Wachstum. In diesen Fällen stellt die evolutionäre Optimierungsstrategie einen kontinuierlichen Wachstumsprozess dar. Ein besonders anschauliches Beispiel hierfür liefert der Schleimpilz *Physarum polycephalum*, dessen Netzbildung auf einfachen lokalen Interaktionen basiert und dennoch zu einer global effizienten Ressourcennutzung führt.

Angesichts der Anzahl der jährlich errichteten Decken, die erhebliche Mengen an Ressourcen wie Beton und Baustahl verbrauchen und somit zur Umweltbelastung beitragen, ist eine Reduktion des Materialeinsatzes sowohl aus ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen erstrebenswert. Die effiziente Bemessung und Optimierung von Plattentragwerken stellt daher eine zentrale Herausforderung im konstruktiven Ingenieurbau dar. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit gewinnen innovative Ansätze zur Materialeinsparung zunehmend an Bedeutung. Biologisch inspirierte Modelle, wie beispielsweise das auf dem Verhalten von *Physarum polycephalum* basierende Netzwerkmodell, eröffnen neue Ansätze für die Optimierung von Tragstrukturen. Ziel dieser Arbeit ist es, das Potenzial eines solchen Modells für die Bemessung und Bewehrungsführung von Plattentragwerken zu analysieren und zu bewerten.

2 Problemstellung

Die Stahlbetonbauweise ist im Hochbau eine der häufigsten Konstruktionsarten. Diese kombiniert die hohe Druckfestigkeit des Betons mit der hohen Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls zu einem leistungsfähigen Verbundwerkstoff, dem Stahlbeton. Die Verlegung des Betonstahls erfolgt in der Praxis meist händisch und generell in einer orthogonalen Weise, um den Bauablauf zu vereinfachen und die Herstellungskosten gering zu halten.

Der tatsächliche Kraftverlauf innerhalb einer Stahlbetondecke bildet sich jedoch nur in wenigen Fällen und begrenzten Bereichen geradlinig aus. Vielmehr verlaufen die Kräfte fließend zwischen den Krafteinleitungs- und den Lastabtragungsbereichen und orientieren sich an den Hauptspannungsrichtungen innerhalb der Platte.

Bei einer erheblichen Abweichung der Bewehrungs- von den Hauptrichtungen wird nicht nur der Stahlverbrauch erhöht, sondern auch die Bruchlast vermindert. Dennoch werden aus praktischen Gründen rechtwinklige (orthogonale) Netze zum Bewehren von Stahlbetonplatten angewendet, die nicht in den Hauptrichtungen der Kräfte verlegt sind. Um die Tragfähigkeit dennoch sicherzustellen, ist es erforderlich, mehr Betonstahl einzusetzen, als bei einer optimalen, kraftflussgerechten Anordnung notwendig wäre. Insgesamt führt dies dazu, dass der Bewehrungsgehalt in einer Decke nach heutigem Stand der Technik, der auf orthogonalen Bewehrungsrastern basiert, höher ist als tatsächlich erforderlich.

Trotz erheblicher Fortschritte in der numerischen Bemessung von Plattentragwerken basieren gängige Verfahren zur Bewehrungsführung meist auf orthogonalen Rasterstrukturen. Diese berücksichtigen jedoch nicht in ausreichendem Maße den tatsächlichen Kraftfluss, was zu ineffizientem Materialeinsatz und suboptimaler Tragfähigkeit führen kann. Darüber hinaus fehlt es an flexiblen, adaptiven Methoden, die sich an unterschiedliche Auflagerkonfigurationen und komplexe Geometrien anpassen lassen. Vor diesem Hintergrund besteht die Notwendigkeit, innovative Ansätze zu erforschen, die eine kraftflussgerechte und materialeffiziente Bewehrungsverlegung ermöglichen. Das in dieser Arbeit untersuchte partikelbasierte Netzwerkmodell auf des Basis Physarum-polycephalum-Algorithmus verspricht, diese Lücke zu schließen.

Zu Beginn der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der Deckenbemessung erläutert. Die statische Berechnung einer Stahlbetondecke wird heutzutage in der Regel mit der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Diese stützt sich auf die Plattentheorie nach Mindlin, um

2 Problemstellung

die statischen Größen zu ermitteln. Mindlin formulierte die allgemeinen Grundgleichungen für schubweiche Platten. Anhand der berechneten Plattenschnittgrößen lassen sich die erforderlichen Bewehrungsmengen bestimmen, die zur Aufnahme der Zugbeanspruchungen notwendig sind.

Im nächsten Schritt wird der Physarum-polycephalum-Algorithmus als bionischer Lösungsansatz vorgestellt. Hierfür wird zuerst auf die Biologie des natürlichen Vorbildes, des Schleimpilzes *Physarum polycephalum*, eingegangen, um dessen Morphologie und Verhaltensweisen zu erläutern. Aufbauend darauf wird das Partikelmodell von Jeff Jones beschrieben. Die Simulation von Jones nutzt die selbstorganisierenden Musterbildungsprozesse, um diese in einem Multi-Partikelmodell nachzubilden.

Der Hauptteil widmet sich der Implementierung der Partikelsimulation in die Spannungsanalyse einer Platte auf Grundlage der FE-Berechnung. Ziel ist es, den Kraftverlauf durch den Partikelfluss abzubilden und so den Lastabtrag des Plattentragwerks als Netzwerk zu visualisieren.

3 Aktueller Stand der Technik

3.1 Plattentragwerke im Bauwesen

Decken sind wichtige Tragwerkselemente im Hochbau. Sie sind flächenförmige, raumbildende, meist ebene Strukturen und werden häufig als massive Bauteile ausgeführt. Eine Ausführungsvariante ist die sogenannte Stahlbetondecke. Diese kommt zum Einsatz, wenn hohe Lasten abgetragen werden müssen, erhöhte Anforderungen an Brand- und Schallschutz bestehen oder eine glatte Unterseite erforderlich ist.

Bauteile aus Stahlbeton verdanken ihre hohe Tragfähigkeit dem Zusammenwirken von Beton und Betonstahl, auch Bewehrung genannt. Der Beton, als künstlicher Stein, ist sehr druckfest, kann im Gegenzug jedoch nur sehr wenig Zug aufnehmen, bevor sich Risse bilden. Die Zugbeanspruchung wird daher durch die eingelegte Bewehrung aufgenommen.[1]

Die statische Bemessung beginnt mit der Definition eines mechanischen Modells, welches das physikalische Tragverhalten des Bauteils abbilden soll. Hierfür werden statischen Aspekte, wie Einwirkungen, Lagerbedingungen und Materialverhalten des statischen Tragsystems vereinfacht, aber dennoch realitätsnah formuliert.[2]

Decken werden grundsätzlich als Platten klassifiziert. Als Platte versteht man ein flächenartiges Bauteil, welches vorwiegend auf Biegung beansprucht wird. Die Belastung erfolgt demnach hauptsächlich senkrecht zur Mittelfläche. Die Plattendefinition begrenzt die Bauteildimension mit einem Verhältnis von $1/5$ von der Gesamtdicke zur Bauteilbreite. Zudem muss die kleinste Stützweite mindestens das Dreifache der Plattendicke betragen. Die Lagerung der Platte erfolgt entweder linienförmig z.B. auf Wänden, punktförmig z.B. auf Stützen oder als Mischsystem. Auflager können nach den Kräften, welche über das Auflager abgetragen werden können, unterschieden werden. Demnach gibt es bezogen auf Freiheitsgrade und die jeweilige Richtung feste, verschiebliche, biegesteife und gelenkige Auflager.

Die Anordnung der Auflager gibt die Spannrichtung einer Platte vor. Eine einachsig gespannte Decke ist beidseitig gelagert und trägt die Lasten in eine Richtung ab. Eine vierseitig gelagerte Decke ist somit zweiachsig gespannt und trägt die Lasten in Längs- und Querrichtung ab. Eine besondere Form von zweiachsig gespannten Platten stellen die Flachdecken dar. Diese werden punktförmig auf Stützen gelagert. Da hier die Auflagerfläche gering ist, konzentrieren sich die

3 Aktueller Stand der Technik

Lasten zur Stütze hin. Der Verlauf der inneren Kräfte ist stark abhängig von der Größe und der Lage der Beanspruchung, sowie der Topologie des statischen Systems.[1]

Für Stahlbetonplatten wird ein linear-elastisches und isotropes Materialmodell verwendet. Der Betonquerschnitt wird demnach als ungerissen betrachtet. Der durch Rissbildung verursachte Steifigkeitsverlust wird zunächst nicht abgebildet. Durch diese Vereinfachung kann das Material mit nur zwei Materialkennwerten, dem Elastizitätsmodul des Betons und der Querdehnzahl, definiert werden.[3]

Schnittgrößen sind die statischen Größen, welche eine rechnerische Erfassung der Bauteilreaktion auf eine Einwirkung wiedergeben. Sie stellen die inneren Kräfte in einem Bauteil dar, welche durch die äußere Beanspruchung hervorgerufen werden. Auf diese beziehen sich alle erforderlichen Nachweisverfahren. Bei der Schnittgrößenermittlung ist daher ein ausreichend realistisches Reaktionsspektrum des Tragwerks zu betrachten. Unterschieden werden diese in Normalkräfte, Querkkräfte und Momente. Anhand der Schnittgrößen können unter Berücksichtigung der Rissbildung die querschnittsspezifischen Spannungen ermittelt werden und mit dem Materialwiderstand des Betons verglichen werden. In Bereichen der Betonzugkraftüberschreitung werden anschließend die erforderlichen Bewehrungsmengen ermittelt.[1]

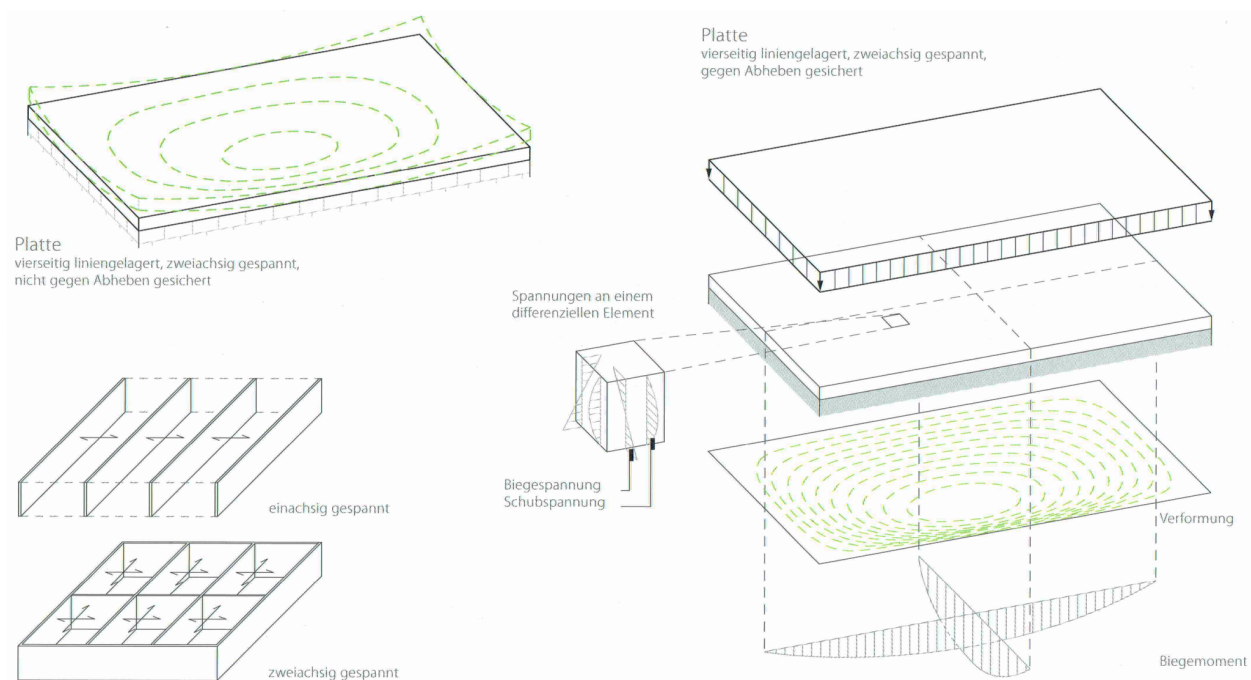


Abb. 3.1: Tragsystem einer Platte [4]

3.2 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode

Die Berechnung von Schnittgrößen, Spannungen und Verformungen und deren Verteilung stellt die Grundlage der statischen Bemessung dar. Bei einigen Bauteilen, wie z.B. Platten, werden heutzutage auf computergestützter, numerische Berechnungsverfahren zurückgegriffen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine der etablierten Simulationsverfahren, welche Schnittgrößen, Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen von Bauteilen errechnet.[3]

Als Grundlage für die mathematische Modellierung werden Energiegleichungen aus der Elastomechanik verwendet. Das lokale Verhalten eines elastischen Körpers basiert auf Gleichgewichtsbedingungen der inneren elastischen Energie und der Arbeit der äußeren Kräfte. Die Lösung dieser starken (lokalen) Differentialgleichungen ist im Allgemeinen nicht analytisch möglich. Um die ursprünglichen Differentialgleichungen numerisch lösbar zu machen, werden diese durch schwache Formulierungen in eine globale und integrale Form überführt. Die Formulierung der integralen Gleichgewichtsbedingungen basiert bei der FEM auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebung. Bei diesem Prinzip verrichten wirkliche Kraftgrößen bei dem simulierten Verschiebungsvorgang Arbeit. Die hierdurch formulierten Integralausdrücke werden für die Berechnung auf sogenannte finite Elemente projiziert.[2]

Die FEM unterteilt dabei die Platte möglichst gleichmäßig in endliche Bereiche auf. Die Elemente sind dabei über Knoten miteinander verknüpft. Die Aufteilung der Platte in finite Elemente erfolgt über eine automatische Netzgenerierung unter Angabe verschiedener Parameter, wie der gewünschten Elementgröße. Da es sich bei der FEM um ein Näherungsverfahren handelt, hängt die Genauigkeit stark von der Elementgröße und Netzverteilung ab.[3]

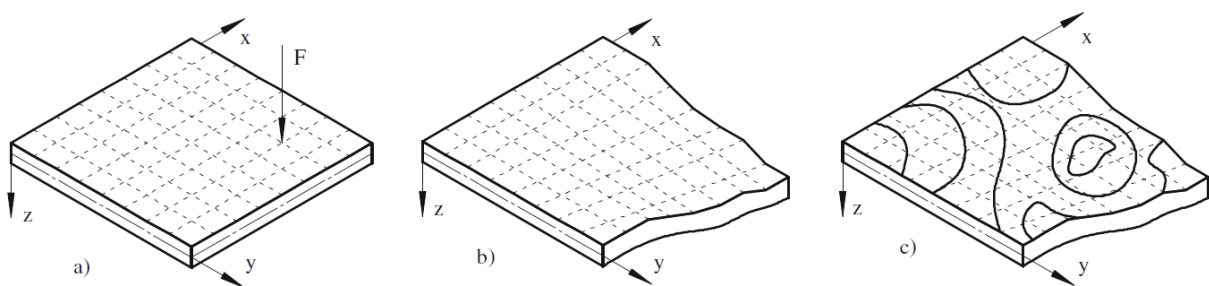


Abb. 3.2: FE-Prinzip an einer Platte [5]

Diese Art von Näherungsmethoden gehört zu den Diskretisierungsverfahren. Es überführt die kontinuierliche schwache Formulierung über Ansatzfunktionen in ein algebraisches Gleichungssystem. In jedem der Elemente werden die Ansatzfunktionen mit den Funktionswerten in den Knoten gewichtet und man erhält elementweise für jeden Knoten Gleichungen, welche die Knotenfreiheitsgrade des gerade betrachteten und der umliegenden Knoten einbeziehen. Für die Auswertung der mechanischen Variablen werden diskrete Größen herangezogen, wie Knotenverschiebungen.

3 Aktueller Stand der Technik

Aufgrund der Diskretisierung muss das Gleichungssystem nur noch für die Berechnungsgebiete der finiten Elemente erfüllt werden. [2]

Als Ansatzfunktionen werden Polynome verwendet, um die physikalische Größen innerhalb eines Elements zu approximieren. Diese Polynome sind mathematische Funktionen, die von den Koordinaten des Elements (z. B. x , y , z) abhängen, mit denen die Elementsteifigkeitsmatrix für jedes Element aufgestellt wird. Mittels den aufgestellten Gleichgewichtsbedingungen wird die Gesamtsteifigkeit der Platte ermittelt und die Verteilung von Größen wie Verformungen oder Spannungen beschrieben. [3]

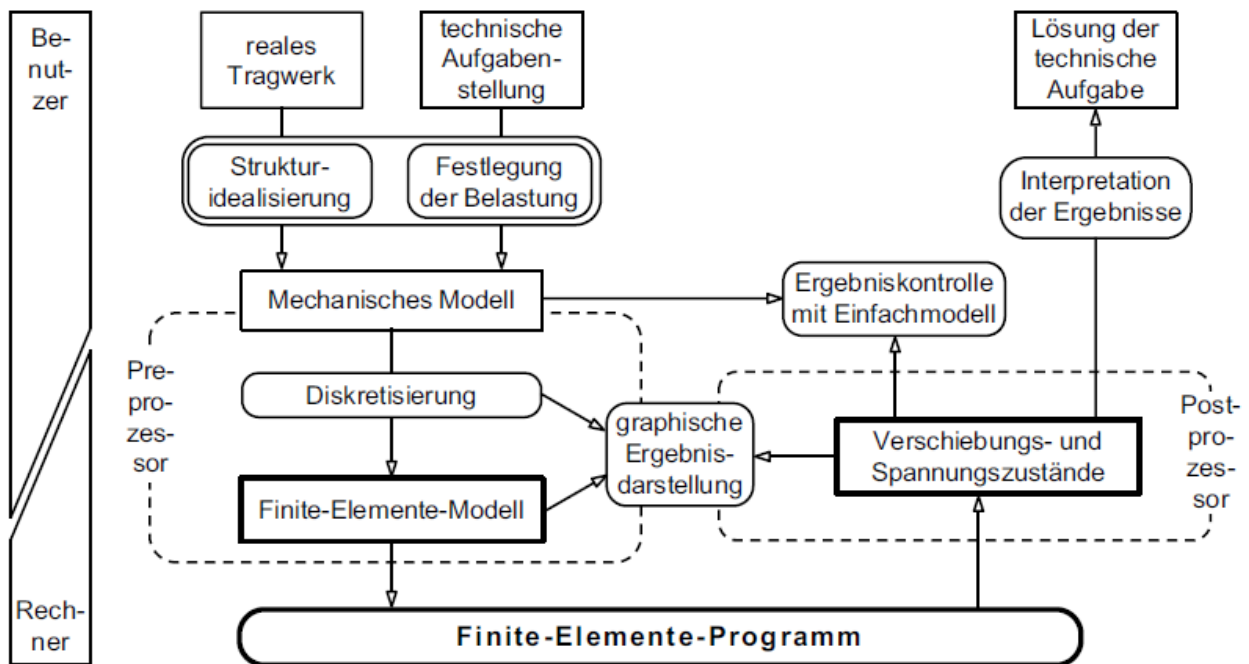


Abb. 3.3: Anwendungsprozess der FEM bei der Berechnung eines statischen Modells [6]

Zur Herleitung und Implementierung von Finite-Elemente-Methoden liefert [7] ausführliche Hintergründe und viele Anwendungsbeispiele.

Plattentheorie nach Mindlin

Auf der Grundlage der FEM basiert die Mindlin-Plattentheorie, bei welcher die allgemeinen Grundgleichungen der linearen Elastizitätstheorie zur Reduzierung auf ein zweidimensionales Problem für schubweiche Platten vereinfacht wurden. Die Modelleingabe bezieht sich dabei auf ein Koordinatensystem, bei welchem die undeformierte Plattenmittelebene in der x - y -Ebene definiert wird. Die Deckflächen werden mit $z = -h/2$ und $z = h/2$ vorgegeben. Die Plattendicke wird hierbei mit h angegeben.[7]

Die Plattentheorie von Mindlin formuliert mehrere Modellannahmen.

Platten verformen sich lediglich senkrecht zur Plattenmittelebene w und zwar unabhängig von z .

$$w = w(x, y) \quad (3.1)$$

Die Plattendicke h erfährt demnach keine Stauchung oder Dehnung infolge von Deformation. Die Platte ist in Dickenrichtung dehnstarr.

$$\varepsilon_z = 0 \quad (3.2)$$

Es wird angenommen, dass die Plattenmittelebene keine Verzerrungen erfährt. Dies bedeutet, dass die Verformung hauptsächlich durch Biegung und nicht durch Membranwirkung entsteht. Die Plattenmittelfläche ist bei der Biegeverformung somit eine neutrale Ebene.

Des Weiteren können die Normalensegmente des Plattenquerschnitts sich auf der Mittelebene verdrehen, die Querschnittfläche bleibt jedoch in einer Geraden. Somit wird der Einfluss der Verformung auf die Schubspannung der Platte berücksichtigt. Die Verdrehwinkel um die Mittelebene werden durch die kinetischen Freiheitsgrade φ_x und φ_y beschrieben. Diese resultieren aus der Verlängerung der unteren Faser und die Verkürzung der oberen Faser infolge einer Momentenbeanspruchung. [8]

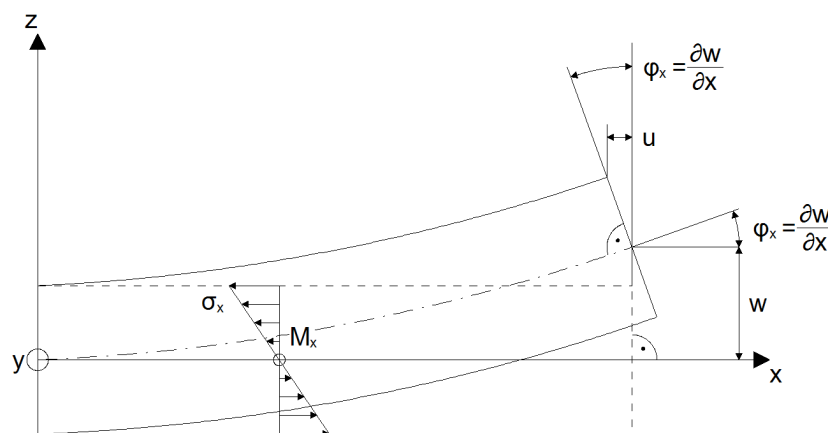


Abb. 3.4: Definition des Neigungswinkels φ_x an der Platte und Einfluss auf die Schubspannung

3 Aktueller Stand der Technik

Für kleine Neigungen gilt $\tan(\varphi) \approx \varphi$, womit die Verschiebungen in x-Richtung u und in y-Richtung v wie folgt angegeben werden können [8]:

$$u(x, y, z) = z\varphi_x(x, y) \quad (3.3a)$$

$$v(x, y, z) = z\varphi_y(x, y) \quad (3.3b)$$

Aus den kinematischen Grundannahmen kann man die Dehnungen ε_x , ε_y , sowie die Schubverzerrungen γ_{xy} , γ_{xz} und γ_{yz} formulieren.[8]

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \quad (3.4a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = z \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \quad (3.4b)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4c)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = z \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right) \quad (3.4d)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.4e)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \varphi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.4f)$$

Bei der Plattentheorie nach Mindlin verhalten sich die Verzerrungen über die Plattendicke unterschiedlich. Die Dehnungen ε_x und ε_y in x- und y-Richtung sowie die Schubverzerrung γ_{xy} in der Plattenebene (ebene Verzerrungen) ändern sich linear in Abhängigkeit zu der Dickenkoordinate z . Die transversalen Schubverzerrungen γ_{xz} und γ_{yz} hingegen haben einen konstanten Verlauf über die Plattendicke.[8]

Um die Komponenten des Spannungstensors zu ermitteln, wird das Hookesche Gesetz für zweidimensional beanspruchte und isotrope Materialien aus der Elastizitätstheorie auf die kinetischen Formeln angewendet. Dieses formuliert bei linear-elastischem Materialverhalten den Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen durch Integration der Kenngrößen E (Elastizitätsmodul) und G (Schubmodul). [9]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Für isotrope Materialien kann das Schubmodul aus dem Elastizitätsmodul und der Querdehnzahl

(Poissonzahl) ν berechnet werden [9]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.6)$$

Somit können die Grundspannungen einer Platte ermittelt werden [8]:

$$\sigma_x = \frac{Ez}{1 - \nu^2} \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \right) \quad (3.7a)$$

$$\sigma_y = \frac{Ez}{1 - \nu^2} \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \right) \quad (3.7b)$$

$$\tau_{xy} = Gz \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right) \quad (3.7c)$$

$$\tau_{xz} = G \left(\varphi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.7d)$$

$$\tau_{yz} = G \left(\varphi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.7e)$$

Die in der Platte auftretenden Spannungen werden zu Querkräften und Momenten zusammengefasst. Bei der Berechnung von Platten werden lediglich Biege- und Drillmomente, sowie Querkräfte ermittelt. Normalkräfte bleiben nach Definition unberücksichtigt. Die Mittelfläche einer Platte weist daher keine Beanspruchung auf.[3]

Die Schnittgrößen werden für eine geeignete Berechnung nach der Plattendefinition durch die Integration der Spannungen über die Plattendicke ermittelt. Die Querkräfte v_x und v_y können dabei aufgrund der Annahme eines konstanten Spannungsverlaufes über eine direkte Integration berechnet werden. Die Momente m_x, m_y und das Drillmoment m_{xy} werden hingegen zunächst mit dem Hebelarm z multipliziert und anschließend integriert, um den linearen Verlauf zu berücksichtigen.[8]

$$m_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x z dz \quad (3.8a)$$

$$m_y = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_y z dz \quad (3.8b)$$

$$m_{xy} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xy} z dz \quad (3.8c)$$

$$v_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{xz} dz \quad (3.8d)$$

$$v_y = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{yz} dz \quad (3.8e)$$

Aus diesen Integralen lassen sich die konstitutive Gleichungen für die Plattenschnittgrößen aufstellen. Anhand der Integration erhält man für die Berechnung der Momente die Plattensteifigkeit K . Diese

3 Aktueller Stand der Technik

beschreibt den Widerstand einer Platte gegen Biegung in Abhängigkeit des Materialverhaltens, der Querdehnung und der Plattendicke.[8]

$$K = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.9)$$

Für die Gleichungen der Querkräfte muss zunächst eine Korrektur für die anfängliche Annahme der konstanten transversalen Schubspannungen τ_{xz} und τ_{yz} erfolgen, da diese zum Einen die lokalen Gleichgewichtsbedingungen und die Randbedingungen verschwindender Schubspannungen $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ an der Plattenoberfläche $z = \pm h/2$ nicht erfüllen. Zum Anderen führt der konstante Verlauf zu zu geringen Schubspannungen in Plattenmitte, da in Wirklichkeit die Schubspannungsverteilung parabolisch ausgeprägt ist. Hierfür wird bei der Mindlin-Plattentheorie eine reduzierte Schubdicke h_s eingeführt, um eine höhere Schubspannung zu erhalten, die sich dem tatsächlichen Wert annähert [8].

$$h_s = \frac{5}{6}h \quad (3.10)$$

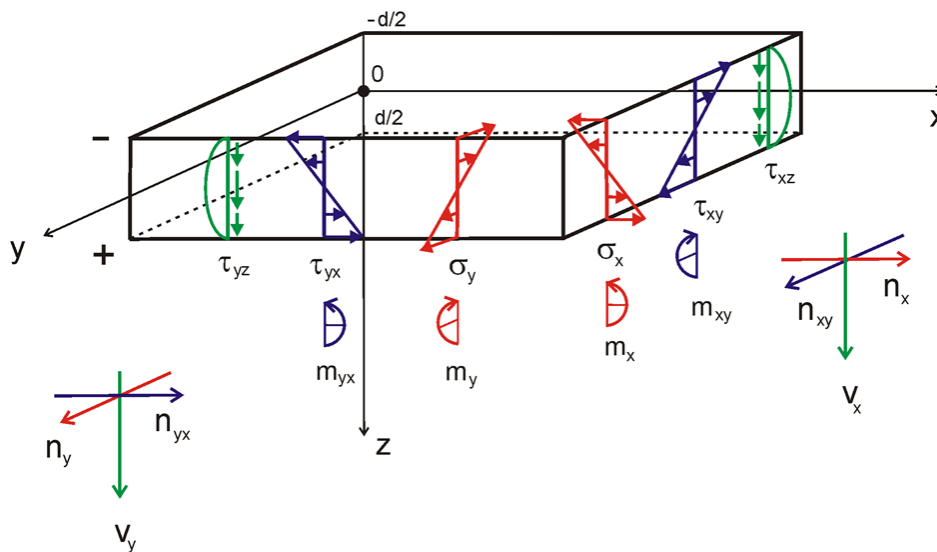


Abb. 3.5: Flächenschnittgrößen und Flächenspannungen [10]

Nach der Mindlin-Plattentheorie ergeben sich somit die folgenden fünf konstitutiven Gleichungen,

welche die Grundschnittgrößen der Plattenbemessung beschreiben:

$$m_x = K \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \right) \quad (3.11a)$$

$$m_y = K \left(\frac{\partial \varphi_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \right) \quad (3.11b)$$

$$m_{xy} = \frac{1-\nu}{2} K \left(\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right) \quad (3.11c)$$

$$v_x = Gh_s \left(\varphi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.11d)$$

$$v_y = Gh_s \left(\varphi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (3.11e)$$

Für die Vervollständigung des Gleichungssystems in einem Element werden nun noch die drei Gleichgewichtsbedingungen benötigt [8]:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.12a)$$

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial y} - v_x = 0 \quad (3.12b)$$

$$\frac{\partial m_y}{\partial y} + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x} - v_y = 0 \quad (3.12c)$$

Das zweidimensionale Plattenproblem kann somit über acht Gleichungen für die acht Unbekannten w , φ_x , φ_y , m_x , m_y , m_{xy} , v_x und v_y beschrieben werden.[8]

Um diese acht Gleichungen zusammenzuführen werden zwei Hilfsgleichungen eingeführt.[8]

$$\Phi = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \quad (3.13a)$$

$$\Psi = \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} \quad (3.13b)$$

Das Mindlin-Plattenmodell lässt sich nun vollständig durch drei gekoppelte und partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschreiben, sodass insgesamt ein Differentialgleichungssystem sechster Ordnung entsteht.[8]

$$K \Delta \Phi + p = 0 \quad (3.14a)$$

$$\Delta w + \Phi - \frac{K}{Gh_s} \Delta \Phi = 0 \quad (3.14b)$$

$$\Psi - \frac{1-\nu}{2} \frac{K}{Gh_s} \Delta \Psi = 0 \quad (3.14c)$$

3 Aktueller Stand der Technik

Mit der Formulierung der Differentialgleichungen nach Mindlin ist umfassende Grundlage für die Berechnung von Platten unter Berücksichtigung von Schubverformungen geschaffen worden. Diese Gleichungen bilden die Basis für die Analyse der Spannungsverläufe sowie die Bestimmung der Hauptmomente, die für die Bemessung und konstruktive Durchbildung von Platten maßgebend sind.

3.3 Berechnung der Hauptbemessungswerte

Für die Bemessung von Stahlbetondecken werden die Grundschnittgrößen zu Hauptschnittgrößen m_1 , m_2 und $v_{max,b}$ umgerechnet. Diese resultieren aus den gleichzeitig auftretenden Größen an einer Bemessungsstelle. Anders als bei den Grundschnittgrößen kann die Richtung der Hauptschnittgrößen von dem xyz-Koordinatensystem der Elemente abweichen. Die Hauptachse 1 gibt den Maximalwert und die Hauptachse 2 den Minimalwert an. Beide Achsen sind dabei stets orthogonal zueinander ausgerichtet.[11],[10]

$$m_1 = \frac{1}{2} \left[m_x + m_y + \sqrt{(m_x - m_y)^2 + 4m_{xy}^2} \right] \quad (3.15a)$$

$$m_2 = \frac{1}{2} \left[m_x + m_y - \sqrt{(m_x - m_y)^2 + 4m_{xy}^2} \right] \quad (3.15b)$$

$$\alpha_b = \frac{1}{2} \left[\arctan \left(\frac{2m_{xy}}{m_x - m_y} \right) \right] \quad (3.15c)$$

$$v_{max,b} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (3.16a)$$

$$\beta_b = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (3.16b)$$

Die Abweichung der Hauptachsen zu dem xyz-Koordinatensystem der Fläche wird mittels der Winkel α_b und β_b ausgedrückt und werden grafisch als Trajektorien ausgegeben. Die Trajektorien sind in der Regel auf die Werte der Momente m_1 und m_2 skaliert. [10]

Äquivalent zu den Hauptschnittgrößen können die Hauptspannungen ermittelt werden. Die Spannungen aus Momentenbeanspruchung werden den beiden Flächenseiten zugeordnet. $\sigma_{1,+}$, $\sigma_{2,+}$ und α_+ sind die Größen der positiven Seite und $\sigma_{1,-}$, $\sigma_{2,-}$ und α_- die Größen der negativen Seite. Die maximale Schubspannung τ_{max} wird davon abweichend senkrecht zur Fläche ermittelt.[10]

$$\sigma_{1,+} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{x,+} + \sigma_{y,+} + \sqrt{(\sigma_{x,+} - \sigma_{y,+})^2 + 4\tau_{xy,+}^2} \right] \quad (3.17a)$$

$$\sigma_{2,+} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{x,+} + \sigma_{y,+} - \sqrt{(\sigma_{x,+} - \sigma_{y,+})^2 + 4\tau_{xy,+}^2} \right] \quad (3.17b)$$

$$\alpha_+ = \frac{1}{2} \arctan 2 \left(\frac{2\tau_{xy,+}}{\sigma_{x,+} - \sigma_{y,+}} \right) \quad (3.17c)$$

$$\sigma_{1,-} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{x,-} + \sigma_{y,-} + \sqrt{(\sigma_{x,-} - \sigma_{y,-})^2 + 4\tau_{xy,-}^2} \right] \quad (3.18a)$$

$$\sigma_{2,-} = \frac{1}{2} \left[\sigma_{x,-} + \sigma_{y,-} - \sqrt{(\sigma_{x,-} - \sigma_{y,-})^2 + 4\tau_{xy,-}^2} \right] \quad (3.18b)$$

$$\alpha_- = \frac{1}{2} \arctan 2 \left(\frac{2\tau_{xy,-}}{\sigma_{x,-} - \sigma_{y,-}} \right) \quad (3.18c)$$

$$\tau_{max} = \sqrt{(\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (3.19)$$

Bei Stahlbetondecken werden die Hauptzugspannungen von dem Bewehrungsnetz übernommen. Die Verlegerichtung der Bewehrung kann aus baupraktischen Gründen von der Orientierung des FE-Netzes, der Plattenorientierung und dem Spannungsverlauf abweichen. Daher werden die Hauptschnittgrößen mittels Transformationsgleichungen an die Bewehrungsrichtung angepasst. Zur Umrechnung gibt es verschiedene Verfahren. Das Verfahren nach Baumann wird als Standardberechnungsmethode für Eurocode 2 in Deutschland herangezogen. Bei dieser Methode wird das Problem der Biegung oder der kombinierten Biegung auf das Problem der reinen Normalkräfte reduzieren. Die Plattendicke wird in N Schichten mit gleicher Dicke unterteilt, um die Normalkraft in jeder Schicht berechnen zu können. Diese Methode kann auch für Tragsysteme verwendet werden, bei welchen die Bewehrungsrichtungen nicht rechtwinklig zueinander und zur Plattenausrichtung sind. Das Verfahren von Baumann wird in [12] genauer behandelt und soll hier nicht weiter aufgeführt werden.

3.4 Deckenbemessung

Die Hauptspannungstrajektorien geben den Verlauf des Kraftflusses innerhalb des Plattentragwerks wieder. Bei einer erheblichen Abweichung der Bewehrungs- von den Hauptrichtungen wird nicht nur der Stahlverbrauch erhöht, sondern auch die Bruchlast vermindert. Aus praktischen Gründen werden orthogonale Bewehrungsnetze, die nicht in den Hauptrichtungen der Kräfte verlegt sind, zum Bewehren von Stahlbetonplatten angewendet.

Durch die Analyse der Hauptspannungstrajektorien lassen sich die Plattenbereiche jedoch hinsichtlich ihrer tatsächlichen Beanspruchung differenziert betrachten. Wird die Bewehrung entsprechend dem Verlauf der Hauptspannungen angeordnet, kann die Tragfähigkeit der Platte signifikant gesteigert werden. Die optimale Bewehrung von Stahlbetonplatten orientiert sich daher idealerweise am Verlauf der Spannungstrajektorien.

Alternative Analysemethoden, wie fortschrittliche numerische Simulationsverfahren bieten die

Möglichkeit, das Tragverhalten von Stahlbetonplatten noch wirklichkeitsnäher abzubilden und die Bewehrungsführung stärker an die tatsächlichen Kraftflüsse anzupassen. Durch den Einsatz solcher Methoden könnten individuelle, trajektorienbasierte Bewehrungskonzepte wirtschaftlicher und sicherer umgesetzt werden, was eine weitere Optimierung des Materialeinsatzes und der Tragfähigkeit ermöglicht.

4 Schleimpilz-Algorithmus

Im Bauwesen bedeutet Nachhaltigkeit unter Anderem der ressourcenschonende Einsatz von Materialien. Trotz der unbestreitbaren Richtigkeit dieses Ansatzes, wird eine sparsame Bauweise oft von den planerischen Möglichkeiten für effizienten Materialeinsatz von und der praktischen Ausführbarkeit beschränkt. In der Konstruktion wird daher auf einfache geometrische Formen zurückgegriffen, um zuverlässige Tragsysteme zu erhalten, wenn auch nicht nachhaltig. Im Kontrast dazu findet man in der Natur spezialisierte Strukturen, geformt durch iteratives Wachstum und den bestehenden Anforderungen. Bei gewachsenen Organismen bestimmt die zu erfüllende Funktion die Gestalt der Struktur und repräsentiert gewissermaßen ihre eigene mechanische Funktionalität. [13]

Biologische Vorgänge und Formen werden durch stetige Fortschreibung und Veränderung optimiert. Anpassungen erfolgen bezogen auf die Evolution schrittweise durch Auslese und Vererbung, wodurch sich verschieden Strategien aufgrund des Verdrängungswettbewerbs entwickeln. Effizienz und Zuverlässigkeit sind weniger das Ziel, sondern eher Voraussetzung der Überlebensstrategie. Das Nachbilden von diesen natürlichen Vorbildern, führt oft nicht zu funktionierenden technischen Lösungen, da sich die synthetischen Bedingungen zu denen in der Natur unterscheiden. Stattdessen kann man sich auf die Kausalität der Optimierungsstrategie konzentrieren. Welchen Grundlagen und Prinzipien liegen der Entwicklung eines Optimierungsvorgangs zugrunde und wie lässt sich dieser technisch übersetzen? [14]

4.1 Schleimpilze

Es existieren unzählige nicht-neuronale Organismen, welche durch die Entwicklung komplexer Mechanismen zur Entscheidungsfindung und Informationsverarbeitung ihren Lebensraum und dessen Ressourcen effizient für sich beanspruchen.

Ein Beispiel für solche biologischen Vorbilder ist *Physarum polycephalum* (griechisch; vielköpfiger Blasenstäubling), ein Vertreter der echten Schleimpilze. Die Myxomyceten oder plasmodialen Schleimpilze haben eine besondere Art der Umgebungsanalyse entwickelt, bei welcher diese sich zunächst gleichmäßig in einem fraktalen Muster auf der Suche nach Nährstoffen ausbreiten und die Stränge verstärken, welche fruchtbar geworden sind. [15]

Die Bezeichnung Schleimpilz umfasst dabei mehrere Arten von eukaryotischen Organismen und

4 Schleimpilz-Algorithmus

bezieht sich auf die Phase des Lebenszyklus, in der diese Organismen als einzellige, freilebende und gallertartige Masse vorkommen.[16]

Diese Masse wird als diploides Plasmodium bezeichnet. Unter den richtigen Umweltbedingungen wird die nächste Lebensphase durch Sporulation eingeleitet und es entwickeln sich kugelförmige Sporangien, in welchem die Meiose stattfindet und welches letztendlich die haploiden Sporen durch aufplatzen freisetzt. Obwohl Physarum einen komplexen Lebenszyklus hat, zeigt das Plasmodium-Stadium die komplexesten und am besten untersuchten Verhaltensweisen.

Das Plasmodium-Stadium wird durch den Keimvorgang eingeleitet. Hier entwickeln sich die Sporen zu haploiden Gameten, den so genannten Myxamöben. Durch den Prozess der Mitose vermehren sich diese unter Zellteilung. Fusionieren zwei oder mehrere dieser Einzeller bildet sich eine diploide Zygote.[15]

Die Zygote wächst durch ungeschlechtliche (mitotische) Zellkernteilung ohne dass sich die Zelle selbst durch Membraneinschnürung verdoppelt. Das bedeutet, dass das Plasmodium ein einziger Zellplasmakörper mit einer einzigen Zellmembran und einer Vielzahl an Zellkernen darstellt.[17]

Die Teilung findet dabei alle 8-9 Stunden synchron statt.[15]

Im Plasmodium ist das Zellplasma als komplexes Netzwerk organisiert. Dieses besteht aus einem schwammartigen Geflecht kontraktiler Aktin- und Myosinfasern, durch das das flüssige Protoplasma strömt. [17]

Die Zellkerne und die restlichen Zellorganellen sind in der Plasmamasse nicht lokal oder strukturell gebunden, sondern sind darin frei beweglich. [18]

Da Schleimpilze keine Zellwand besitzen benötigen sie eine andere Form von Schutz. Die größte Gefahr stellt dabei das Austrocknen dar, weshalb Schleimpilze eine Art flexibles Exoskelett, eine Schleimscheide produzieren.

Das Ausgangsplasmodium bildet in der frühen Entwicklungsphase zunächst einen Hauptstrang aus, welcher sich durch den rhythmischen Teilungsvorgang zu einer anterior flächigen Netzstruktur aufzweigt. Diese ist hierarchisch in größeren Hauptkanälen und dazwischenliegenden kleineren Verbindungen differenzierbar. Die dickeren Kanäle weisen am Anfang durch das deutliche Vorhandensein von Ektoplasma eine höhere Strukturstabilität auf, verzweigen sich je größer der Abstand zum Ursprung wird und bilden immer feiner werdende Verzweigungen.[19]

Das Ektoplasma dient als die äußere, dichtere und viskosere Schicht des Zytoplasmas, die direkt unter der Zellmembran liegt und bildet die Wandung der röhrenförmigen Strukturen oder Adern, durch die das flüssige Endoplasma strömt. Zudem befinden sich dort spezielle Proteinfilamentstrukturen, welche für die pulsierende Bewegung des Schleimpilzes verantwortlich sind.[18]

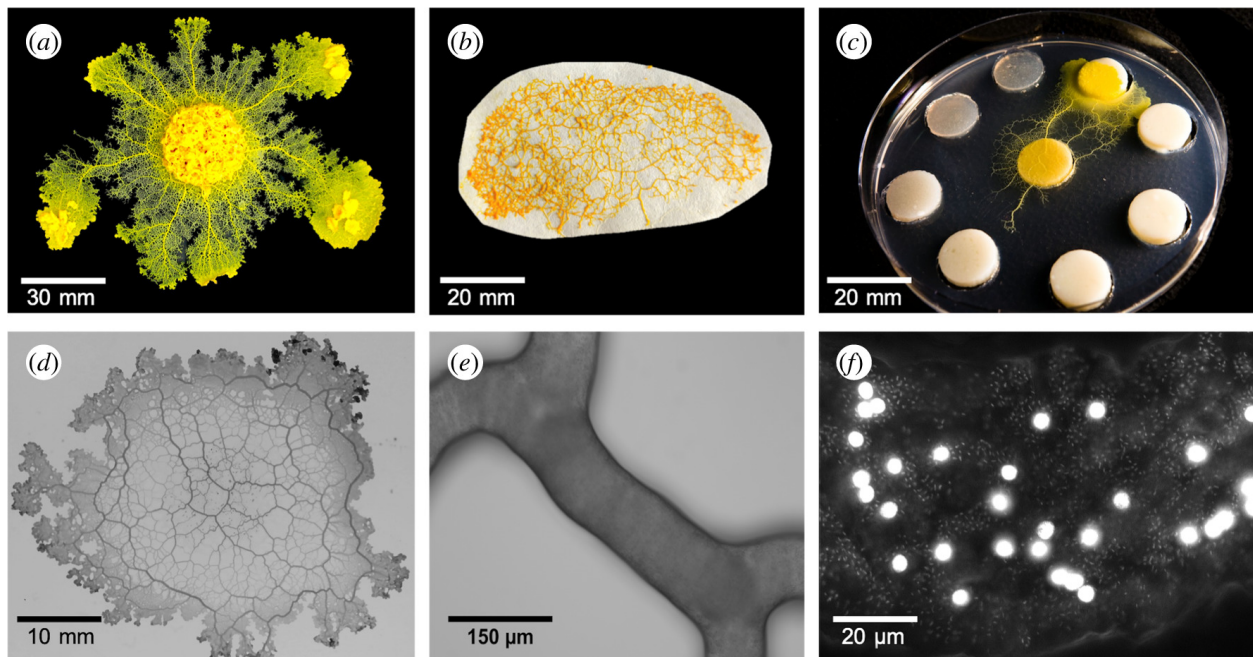


Abb. 4.1: (a) Makroplasmodium, die vegetative Phase von *P. polycephalum*; (b) Sklerotium, das Ruhestadium; (c) ein Schleimpilz trifft eine Entscheidung zwischen Nahrungsquellen unterschiedlicher Qualität; (d) das Adernetzwerk; (e) eine vergrößerte Ader; (f) mit DAPI eingefärbte Zellkerne im Plasmodium [20]

4.1.1 Plasmaströmung

Das Endoplasma enthält alle, für die zellulären Prozesse notwendigen Organellen und ist zudem zuständig für die gleichmäßige Verteilung von Nähr- und Botenstoffen durch die gesamte retikulierte Struktur des Schleimpilzes. Die pulsierende Bewegung des Endoplasmas ist als Plasmaströmung bekannt, welche sich durch ein zyklisches und rhythmisches Fließmuster durch Kontraktion des Ektoplasmas und damit der Plasmamembran charakterisiert. Der protoplasmatische Strom kann dabei Spitzenwerte von 1,35 Mikrometer pro Sekunde erreichen. Die Funktion umfasst nicht nur die Homogenisierung und Bewegung der Stoffe im gesamten Plasmodium, sondern dient auch als Grundlage der Fortbewegung. Lokalisierte Kontraktionen werden durch ein Aktin-Myosin-Kontraktilsystem von Fasern am vorderen Rand des Plasmodiumfächers in der Bewegungsrichtung des Schleimpilzes erzeugt. Die Strömungsdauer hält in der Bewegungsrichtung länger an und verursacht ein Hervorwölben und Anwachsen des Fächers.[19] Die Oszillation erzeugt somit hydraulische Druckunterschiede, wodurch das Endoplasma innerhalb kurzer Zeit durch die sich mit dem ansteigenden Druck ausdehnenden Adern in einen definierten Bereich in der Peripherie gepumpt wird und anschließend die Strömungsrichtung wechselt.[18] Diese zyklische Oszillation hat eine Periode von 2-3 Minuten. Durch diesen Pendelstrom breitet sich das Plasmodium am Rand immer weiter aus. Gleichzeitig spalten sich die Adern immer weiter auf und verzüngen ihren

Durchmesser.[15]

4.1.2 Bewegungsmechanismen

Die Fortbewegung des Schleimpilzes dient primär der Nahrungssuche. Das Plasmodium bewegt sich auf Nahrungsquellen zu, umschließt und verdaut diese. Hierfür breitet sich das Plasmodium in einem pulsierenden Rhythmus durch abwechselnde Kontraktion und Expansion aus. Die starke Kopplung zwischen Membrankontraktion und Strömungsbewegung beruht auf der Unkomprimierbarkeit des Protoplasmas, sodass Volumenänderungen durch Membranveränderungen ausgeglichen werden. Der Bewegungsmechanismus basiert auf der Bildung und Auflösung eines kompakten Netzwerkes von Actomyosin-Fibrillen in der peripheren Region (anterior region) der Zelle, direkt unter der Zellmembran.

Die kontraktile Struktur der Actomyosin-Fibrillen setzen sich aus Aktin- und Myosinfilamenten zusammen.[15] Diese sind zentrale Komponenten des Zytoskeletts. Die Zellbewegung geschieht hierbei durch die Interaktion zwischen Aktinfilamenten und dem Protein Myosin.

Aktinfilamente sind am Zytoskelett durch spezielle Proteine fest verbunden. Die Grundbausteine sind sogenannte Aktin-Monomere. Diese Monomere verbinden sich zu langen Ketten, die dann eine doppelsträngige Helixstruktur bilden.

Innerhalb der Aktinfilamente befinden sich zudem regulatorische Proteine. Diese Proteine beeinflussen die Polymerisation (Verlängerung) und Depolymerisation (Verkürzung) der Aktinfilamente, sowie ihre Interaktionen mit anderen zellulären Strukturen. Wenn Calciumionen an diese regulatorischen Proteine binden, werden Myosin-Bindungsstellen freigegeben, wodurch Bereiche entstehen, an die das Protein Myosin andocken kann.

Ein einzelnes Myosinmolekül hat drei wesentliche Komponenten: das Köpfchen, welches sich an die Bindestellen positioniert und durch Spaltung von ATP Energie freisetzt, einen beweglichen Hals und daran anschließend einen Schaft. Mehrere Myosinmoleküle schließen sich in einer parallelen Ausrichtung der Schäfte zu einem Myosinfilament zusammen.

Die Aktinfilamente sind orthogonal und gegenüberstehend aneinandergereiht. Dazwischen befinden sich die Myosinfilamente, wobei die Myosinköpfchen seitlich abgewinkelt und versetzt zueinander ausgerichtet zu den Aktinfilamenten sind.[17]

Soll eine Bewegung stattfinden, werden Calciumionen ausgeschüttet und geben durch die Bindung an die regulatorischen Proteine die Myosinbindestellen frei. Die Myosinköpfchen rasten anschließend im 90°-Winkel an die energiereichste von insgesamt vier Bindungsstellen ein. In einer Kettenreaktion knickt das Köpfchen mithilfe des beweglichen Halses ab, indem es die weiteren drei Bindungsstellen abfährt, bis es an die energieärmste Stelle einrastet und einen 45°-Winkel erreicht. Durch diese Bewegung wird die Fibrille und somit das Zellplasma kontrahiert. Dieser Vorgang wird wiederholt, indem ein ATP an ein Myosinköpfchen bindet, wodurch sich die Form ändert und sich vom Aktinfilament löst. Es wird ein ADP und ein Phosphat freigesetzt und das

Köpfchen kehrt in seine 90°-Ausgangslage zurück.

Die Relaxation erfolgt, indem keine weiteren Calciumionen mehr ausgeschüttet werden und die restlichen Calciumionen mittels Ionenpumpen entfernt werden. Diese Art der Fortbewegung ist sehr ähnlich zur muskulären Fortbewegung.[17]

Die Polymerisation von Aktinfilamenten ermöglicht es dem Schleimpilz auch Pseudopodien für richtungsmotivierte Bewegungen auszubilden. Diese Scheinfüßchen sind zelluläre Ausstülpungen des Zellplasmas und können binnen weniger Minuten an den Vorderenden der Zelle entstehen und auch wieder zurückgebildet werden.[21]

4.1.3 Chemotaxis

Schleimpilze werden in feuchten Waldgebieten in den Tropen und Subtropen vorgefunden. Als Nahrung dient totes oder lebendiges organisches Material, welches sich auf modrigem Holz vorfinden lässt. Dabei reagieren Schleimpilze auf chemische Reize, welche durch chemosensorischen Rezeptoren aufgenommen werden. Die Fortbewegungsrichtung wird daher von extrazellulären Einflüssen bestimmt.[15]

Diese Richtungsbeeinflussung des Bewegungsapparates geschieht in Form von Stoffkonzentrationsgradienten und wird als Chemotaxis bezeichnet.[16]

Schleimpilze können dabei auf Attraktanten in Form von Anlockung (positive Chemotaxis) reagieren oder im Gegensatz auf Repellentien (negative Chemotaxis) als Abstoßungsverhalten aufzeigen. Der Reaktionsgrad ist dabei direkt abhängig von den Konzentrationsunterschieden der chemischen Stoffe.[22]

Wenn Schleimpilze die Umgebung erkunden, beginnen sie sich in alle Richtungen ungleichmäßig aufzufächern. Sobald Nahrung detektiert wird, konzentriert sich der Bewegungsmechanismus in Richtung des Lockstoffes und die entsprechenden Adern verstärken sich, um den Zugang zu diesen Ressourcen zu optimieren.[16]

Dieser Nahrungsbeschaffungsmechanismus erfolgt als Reaktion auf Weichmacher, welche an dem Ort der Nahrungsquelle freigesetzt werden und diesen somit im Röhrensystem des Schleimpilzes markieren. Die Konzentration des Weichmachers bestimmt dabei die Größe der Röhrendurchmesser. Viel Weichmacher verursachen eine lokale Verdünnung der äußeren Membranstruktur und sorgen damit für ein Wachstum der Röhren und eine Steigerung der Durchflussmenge des Plasmas. Als Folge darauf verringert sich der osmotische Druck und somit der Durchmesser der entfernteren Röhren. Die Bewegung und das generelle Wachstum des Schleimpilzes wird in Richtung der Nahrung priorisiert. Es entstehen vermehrt neue protoplasmatische Adern, die die Nahrungsquellen verbinden und Protoplasma transportieren. Als Reaktion auf eine Nahrungsquelle wird zudem innerhalb des Netzwerkes des Schleimpilzes eine Röhrendurchmesser-Hierarchie entwickelt, welche in gewisser Hinsicht eine Form von assoziativen Gedächtnisses darstellt, in welchem der Nährstoffstandort gespeichert ist.[23] Ein Schleimpilz entwickelt somit sein Netzwerk bei der Nahrungssuche

4 Schleimpilz-Algorithmus

nach Bedarf. Bestimmte Bereiche werden ausweitet, verdichtet und verstärkt, und andere wieder abgebaut und schließlich auflöst. Erstaunlicherweise findet dieser immer die kürzeste und optimale Verbindung zu Nahrungsquellen und sorgt für eine effiziente Verteilung der Nährstoffe im ganzen Zellkörper.[21]

4.1.4 Suchverhalten

Der beeindruckende Vorgang der Nahrungssuche von *Physarum polycephalum* wurde in einer Vielzahl von Experimenten beobachtet, bei welchem ein Schleimpilz in einem Labyrinth mit einer oder mehreren Nahrungsquellen gesetzt wurde. Nach kurzer Zeit löst der Schleimpilz mittels diesem Mechanismus das Wegeproblem und bildet einen Plasmodienstrang, welcher die effektivste Route zur Nahrung darstellt.[21]

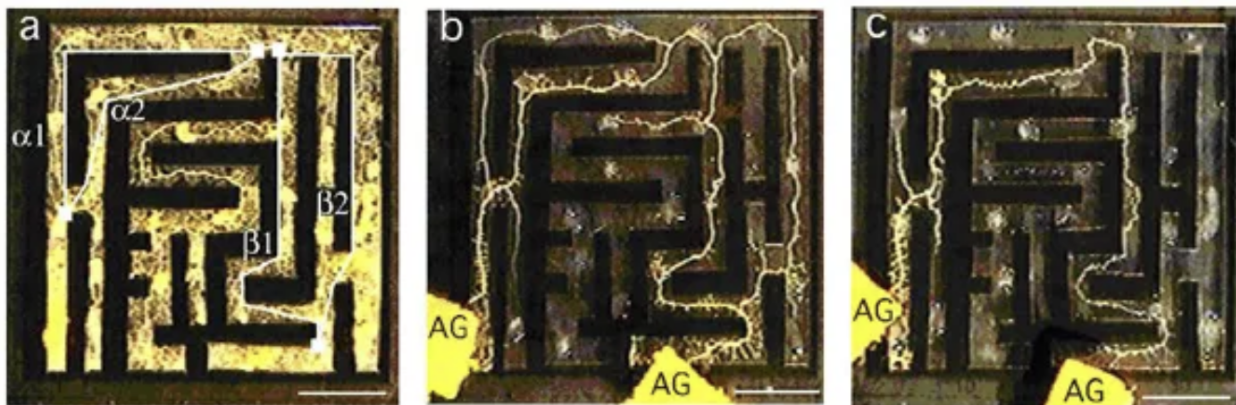


Abb. 4.2: *Physarum polycephalum* durchwächst ein Labyrinth und findet dabei den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten (hier markiert mit AG, meist ein Nährstoff wie Haferflocken). Anfangs breitet sich das Plasmodium im gesamten Labyrinth aus (linkes Bild), zieht sich dann aber nach und nach aus den Sackgassen zurück und bildet schließlich einen effizienten Verbindungsweg zwischen den Nahrungsquellen (mittleres und rechtes Bild). Dieses Verhalten wird als ein Beispiel für biologisches Problemlösen betrachtet.[24]

Das Suchverhalten von *Physarum polycephalum* lässt sich als eine Form der natürlichen Berechnung interpretieren. Die Verteilung von Nahrungsquellen stellt die Eingabedaten dar, während die entstehende Netzwerkstruktur das Ergebnis repräsentiert. Der Schleimpilz löst auf natürliche Weise komplexe Optimierungsaufgaben, etwa das Finden kürzester Wege oder das Verbinden mehrerer Punkte mit minimalem Aufwand. Die Topologie seines Netzwerks wird dabei durch Umgebungsreize und chemische Gradienten gesteuert.[24]

Die Fähigkeit, komplexe, verteilte Berechnungen ohne ein zentrales Nervensystem durchzuführen, hat in den letzten Jahren intensive Forschung inspiriert. Die zentrale Herausforderung besteht darin, wie sich dieser biologische Computer gezielt programmieren und steuern lässt.

4.2 Schleimpilzsimulation

Einfache Organismen, wie der Schleimpilz, unterliegen primitiven Mechanismen der Entscheidungsfindung basierend auf sensorischer Wahrnehmung von Konzentrationsgradienten. Diese beeinflussen im Wesentlichen die Form des Wachstums und der damit verbundenen Musterbildung.[21] Nakagaki et al. war einer der Ersten, welcher das Potenzial in den quasi-physikalischen Verhaltensmechanismen von Schleimpilzen sah. Er nutzte den einzelligen Schleimpilz *Physarum polycephalum* für das experimentelle Lösen von Wegplanungsproblemen. [25] *Physarum polycephalum* wurde als lebendige Rechenplattform angewendet und konnte trotz seiner einfachen Beschaffenheit, komplexe Rechenaufgaben bewältigen. Die entstandenen Transportnetzwerke hatten hohe Übereinstimmung mit den Proximitätsgraphen in der Toussaint-Hierarchie. [26] Darauf aufbauend gab es eine Vielzahl an Forschungsprojekten, welche versuchten die Mechanismen und Fähigkeiten von diesem Schleimpilz mathematisch zu erfassen und auf diverse wissenschaftliche Bereiche von räumlicher Graphenprobleme, über logische Maschinen bis hin zu robotischer Steuerung zu übertragen.[25]

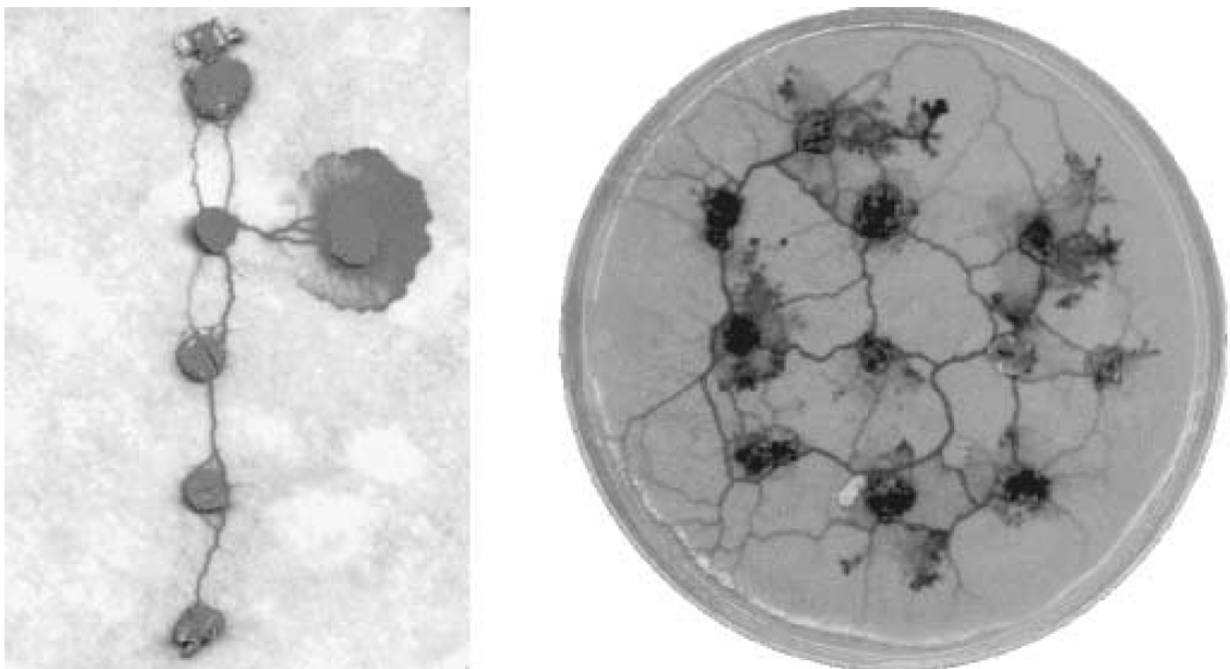


Abb. 4.3: Links: Darstellung des protoplasmatischen Röhrennetzwerks (vertikale Verbindungen zwischen Haferflocken) und der aktiven Plasmodium-Wachstumsfront des *Physarum polycephalum*. Rechts: Bildung eines protoplasmatischen Röhrennetzwerks innerhalb des Plasmodiums, das Nährstoffquellen (Haferflocken) verbindet. [25]

Was den echten Schleimpilz *Physarum polycephalum* als Forschungsobjekt so attraktiv macht, ist seine simple Biologie und die Möglichkeit, Ergebnisse von Simulationen im Labor ohne erheblichen Aufwand zu kontrollieren.

4 Schleimpilz-Algorithmus

Die beobachteten Musterbildung umfasst Wachstum, Bewegung, aber auch Flächenreduktion. Diese Vorgehensweise entwickelte sich bei Schleimpilzen primär für eine effizientere Nahrungssuche über die Maximierung der Erkundungsfläche durch ein breit vernetztes Wachstumsmuster und der Optimierung des internen Nährstofftransport über die Minimalisierung des notwendigen Transportweges durch die Veränderung des protoplasmatischen Röhrennetzwerkes. *Physarum polycephalum* demonstriert bemerkenswerte adaptive Musterbildungsprozesse. Da der Schleimpilz weder ein Nervensystem noch ähnlich spezialisiertes Gewebe besitzt, stellt sich die Frage, wie diese Aufgaben bewältigt werden.[25]

Jeff Jones entwickelte, basierend auf dem adaptiven Verhalten von *Physarum polycephalum* als Reaktion auf Nahrungsquellen, ein Multi-Partikelmodell für komplexe emergente Musterbildung und -evolution von Transportnetzwerken. Dieses verwendet einfache Partikelpopulationen, deren Verhaltensweisen durch synthetische Chemotaxis beeinflusst werden. Die Muster bilden sich hierdurch aus dem dynamischen Fluss der Partikelbewegung. Die Steuerung wird lokal durch einfache Mechanismen unter dem Ansatz vorwärtsgerichteter Sensoren generiert.[25] Durch die quasiphysikalischen und emergenten Eigenschaften des Modells kann dieses für die Lösung von geometrischen Problemen herangezogen werden. Die Problemstellung wird hierbei durch die Definition von virtuellen Nährstoffquellen in Form von Netzwerkknoten definiert. [26]

Jones approximiert die Bestandteile des Plasmodium mit einheitlichen Partikeln. Diese bilden sowohl die Masse aus Aktin-Myosin-Fasern (Gel), als auch das Protoplasma (Sol) innerhalb der Adern ab. Die Bildung des charakteristischen Transportnetzes durch die Oszillationen des Plasmodiums ist ein Ergebnis aus dem steifigkeitsinduziertem Widerstand der Gel-Matrix gegen den Sol-Fluss und den Kontraktionen der Aktin-Myosin-Fasern. Der hierdurch erzeugte hydrostatische Druck ist verantwortlich für die pulsierende Strömung des Protoplasmas und der Anpassung der Aderndicke innerhalb des Plasmodiums. Das Zusammenspiel von beiden Komponenten beschreibt Jones als Gel/Sol-Interaktion und die Partikel als hypothetische Einheiten, durch welche die Interaktion simuliert wird. Die Bewegung der Partikel stellt den protoplasmatischen Sol-Fluss dar. Die sensorische Interferenz zwischen den Partikeln in Verbindung mit der Implementierung der Partikel mit diskreten, nicht überlappenden Positionen erzeugt eine dichte Matrix, welche die steife Gel-Struktur abbildet. Die Partikel werden als Pixel in eine simulierte Umgebung in Form eines digitalisierten Graustufenbild gesetzt. Die verschiedenen Elemente des Umfeldes, wie leerer Raum, Grenzen, Nährstoffquellen werden über bestimmte Graustufenwerte definiert. [26]

4.2.1 Partikel

Der protoplasmatische Fluss des Schleimpilzes wird in einzelne Partikel-Einheiten aufgelöst. Jeder Partikel simuliert das Reiz-Reaktions-Verhalten durch das Folgen einfacher Regeln. Die Morphologie und der grundlegende Algorithmus ist bei jedem Partikel identisch. In einer zweidimensionalen Umgebung werden eine Vielzahl von Partikeln an einer zufälligen und unbesetzten Position mit

einer zufälligen Ausrichtung erzeugt. An jeder Position befindet sich jeweils nur ein Partikel gleichzeitig.[25]

Die zelluläre Chemotaxis des Schleimpilzes wird mit Hilfe von Chemoattraktantwerten in dem Modell numerisch simuliert.

Zunächst werden die Partikel mittels sensorischer Analyse in Richtung der Attraktorgradienten neu ausgerichtet. Dies stellt den sensorischen Schritt des Partikelalgorithmus dar. Dabei reagieren drei vordere Sensoren auf lokale Attraktorgradienten für die Bestimmung der Bewegungsrichtung des Partikels. [25] Die Ausrichtung erfolgt durch eine einfache Links- oder Rechtsdrehung bei jeder Iteration wird der einzelne Partikel zum Ursprung der stärksten Chemoattraktantquelle im näherem Umfeld orientiert.[26]

Anschließend wird der motorische Schritt eingeleitet. Es wird zunächst geprüft, ob die Position direkt vor der aktuellen Ausrichtung des Partikels unbesetzt ist. Wenn dies der Fall ist und eine Bewegung erfolgreich ausgeführt werden kann, nimmt dieser die neue Position ein und setzt gleichzeitig einen konstanten Chemoattraktantwert frei. Die Schrittweite entspricht hierbei immer eine Einheit der Umgebungsdefinition.[25] Aufgrund der Positionierung der Sensoren ist jede Bewegung immer vorwärtsbetont. [26] Ist die Position bereits besetzt, wird keine Bewegung ausgeführt und somit auch kein Chemoattraktant abgelegt. Stattdessen erhält der Partikel eine neue, zufällige Ausrichtung.

Beide Teilschritte (sensorisch und motorisch) geschehen immer nur für eine bestimmte Anzahl an Partikeln gleichzeitig, welche zufällig aus der gesamten Population gewählt wurden, um die Möglichkeit langfristiger Voreingenommenheit durch sequenzielle Reihenfolge zu vermeiden. Wenn dieser Vorgang für die ganze Population ausgeführt wurde, stellt dies einen Systemschritt dar, welcher anschließend solange wiederholt wird, bis die Simulation angehalten wird oder eine definierte Anzahl der Iterationen erreicht wurde.[25]

Die Sensoren befinden sich in einem gewissen Abstand (SO) zum Partikel, um eine gegenseitige Beeinflussung innerhalb der Partikelpopulation zu gewähren. [25] Die Aktionen von benachbarten Partikeln können durch die Sensoren wahrgenommen werden und haben Einfluss auf deren Reaktion zur Umgebung.[26] Für das Simulieren komplexer Verhaltensweisen ist die Reaktion eines Partikels auf die Aktionen eines naheliegenden Partikels ein wichtiger Grundsatz. Wenn der gleiche Chemoattraktant von einer Population erzeugt und auch wahrgenommen werden kann, spricht man von autokrinen Chemotaxis-Verhaltensweisen. Diese Verhaltensart erzeugt eine gleichmäßige Aggregation der Population und sorgen für den Zusammenhalt.

Die Partikel interagieren nicht nur durch wechselseitige Anziehung miteinander, sondern reagieren in gleicher Weise auf die gleiche Substanz in Bezug auf Nahrungsquellen. Die Definition des gleichen Chemoattraktanten als Nahrungsquelle und zur Darstellung von Änderungen im Fluss des internen Protoplasmas vereinfacht die Vorgänge im realen Organismus.

Das Modell umfasst verschiedenen Parameter. Diese steuern zum Einen die Simulation des Partikelmodells als Ganzes, zum Anderen können die Verhaltensweisen der Partikel im einzelnen beeinflusst werden. Die größten Auswirkungen haben dabei die drei Hauptpartikelparameter

4 Schleimpilz-Algorithmus

(Sensorwinkel SA, Rotationswinkel RA und Sensorabstand SO), die die Musterbildung signifikant beeinflussen und die zwei Rahmenparameter (Populationsgröße %p und Diffusionszerfallsfaktor decayT), welche signifikante Auswirkungen auf die Simulationsumgebung haben. [25]

```
[Motor stage]
- Attempt move forwards in current direction
- If (moved forwards successfully)
    Deposit trail in new location
- Else
    Choose random new orientation

[Sensory stage]
- Sample trail map values
- if (F > FL) && (F > FR)
    - Stay facing same direction
    - Return
- Else if (F < FL) && (F < FR)
    Rotate randomly left or right by RA
- Else if (FL < FR)
    Rotate right by RA
- Else if (FR < FL)
    Rotate left by RA
- Else
    Continue facing same direction
```

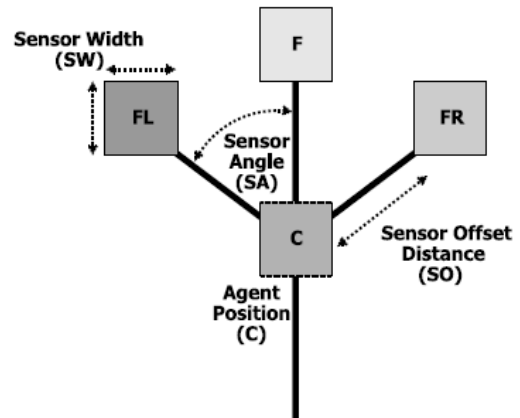


Abb. 4.4: Verhaltensalgorithmus und Partikelmorphologie. Links: Der Pseudocodes des motorisch-sensorischen Algorithmus eines einzelnen Partikels. Rechts: Die individuelle Partikelmorphologie basiert auf der zentrale Position mit vorwärtsgerichtete und versetzten Sensoren. [25]

Modellparameter

Parameter	Bezeichnung	Wert	Beschreibung
Rahmenumgebung	Bildbasierte Umgebung	200 x 200 Pixel	Umgebung, die durch ein Graustufenbild festgelegt ist. Bestimmte Graustufen entsprechen Eigenschaften der Umgebung (Hindernisse, Nahrungsquellen, Startpunkte, Ausgänge).
	%p	3-15	Population als Prozentsatz der Bildfläche
	diffK	3	Größe der Diffusionskernel
	decayT	0,1	Diffusionszerfallsfaktor für Chemoattraktant auf der Spurkarte
	wProj	0,01-0,1	Projektionsgrad für vorgegebene Musterreize

	Begrenzung	Periodisch	Begrenzungsbedingungen der Diffusions- und Partikeldefinition
Partikel	SA	22,5° oder 45°	FL und FR Sensorwinkel ausgehend von der mittleren Position
	RA	45°	Rotationswinkel
	SO	9 Pixel	Sensorabstand
	SW	1 Pixel	Sensorbreite
	SS	1 Pixel pro Systemschritt	Schrittgröße eines Partikels pro Systemschritt
	depT	5	Abgabemenge der Chemoattraktanten pro Systemschritt
	pCD	0	Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Richtungsänderung
	sMin	0	Empfindlichkeitsschwelle

Tab. 4.2: Modell-Parameter [25]

4.2.2 Digitale Petrischale

Die Experimente von Adamatzky wurden in Petrischalen, welche mit feuchtem Filterpapier oder Agar-Substraten präpariert wurden, durchgeführt. Für den simulierten Organismus wird eine digitale Nachahmung der Petrischale implementiert. [26] Die digitale Petrischale ist in zwei Ebenen aufgeteilt, welche sich in Größe und Koordinatenstruktur gegenseitig entsprechen. Die Partikel bewegen sich dabei auf der ersten Ebene in einer zweidimensionalen Datenlandschaft, in welcher ebenfalls die synthetische Umgebung konfiguriert ist. In der zweiten Ebene, der sogenannten Spurkarte, werden die chemotaxischen Attraktanten implementiert. Die Partikel greifen auf diese Datenstruktur zu, um die Stimuli sensorisch auszulesen oder auch die Datenstruktur durch die abgesetzten Chemoattraktanten nach erfolgreicher Bewegungsausführung zu ergänzen.[25]

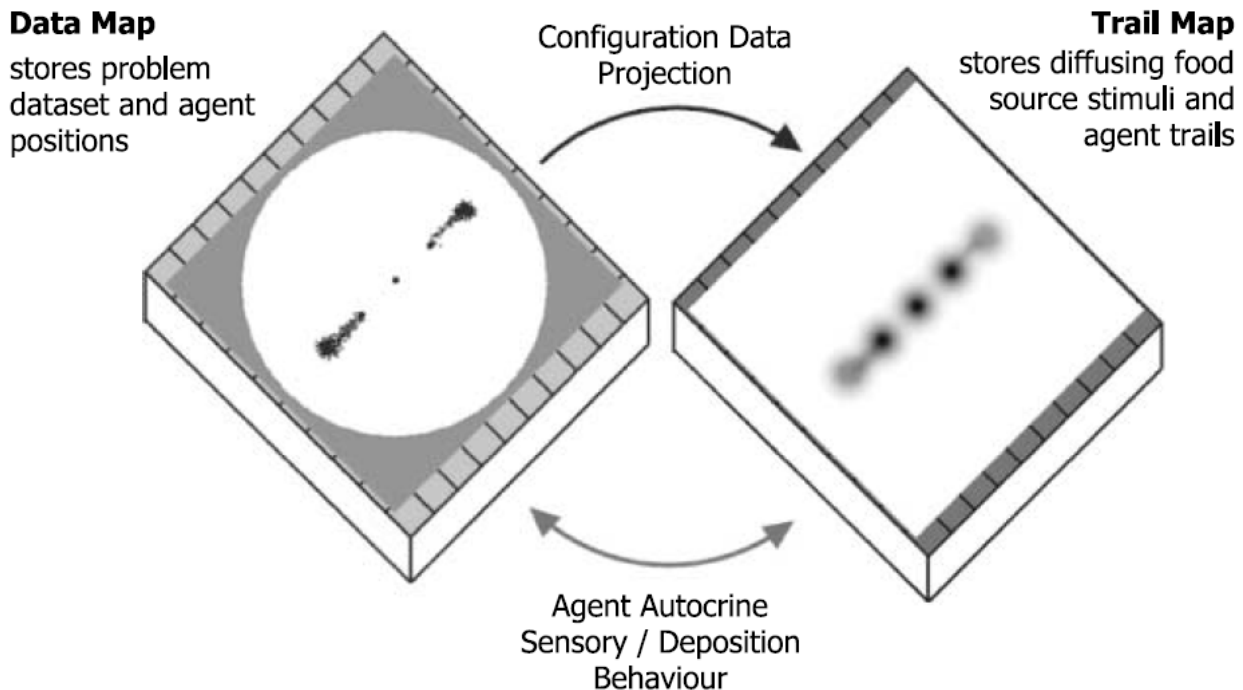


Abb. 4.5: Ebenenstruktur des Modells [25]

Die Datenstruktur der Modellierung kombiniert sowohl diskrete als auch kontinuierliche Elemente. Die Positionen der Partikel über Koordinaten innerhalb eines Zellenrasters diskretisiert. Jede Zelle im Raster kann nur einen Partikel enthalten. Für eine genaue Definition der Position und Bewegungsrichtung verwendet jeder Partikel interne Gleitkommawerte. Diese kontinuierlichen Werte ermöglichen eine präzisere Modellierung von Bewegungen und Interaktionen. Die Gleitkommawerte werden gerundet, um die nächstgelegene Rasterzelle zu bestimmen. Dies ermöglicht eine flexible Bewegung, ohne vollständig von der Rasterstruktur abhängig zu sein. Der semi-kontinuierliche Ansatz kombiniert die Präzision der kontinuierlichen Werte mit der Einfachheit und Effizienz der diskreten Rasterstruktur. Die hybride Modellierung nutzt sowohl die Vorteile diskreter als auch kontinuierlicher Systeme, um komplexe Verhaltensweisen realistischer darzustellen.[25]

Umwelteffekte

Nach jeder Iteration werden Effekte der Verdunstung und Diffusion auf die Chemoattraktanten, welche sich auf der Spurkarte befinden, angewendet. Durch die Verwendung eines einfachen, pseudoparallelen Mittelwertfilters in einem 3x3 Kernel werden die Werte der Reize auf benachbarte Zellen verteilt, um so einen Diffusionseffekt über die Ausbildung eines Konzentrationsgradienten zu erzeugen.[25] Die über den Gewichtungsfaktor gesteuerte Reizintensität, wie auch die definierte Fläche, welche von der Nahrungsquelle in Anspruch genommen wird, wirkt sich im Wesentlichen

auf die Reizausbreitung und der Konzentrationsgradienten ausgehend von der Nahrungsquelle aus.[26]

Zudem werden die Werte über einen gewählten Zerfallswert bei jeder Iteration reduziert, um die Einflüsse von Verdunstung zu simulieren und somit die Einflüsse der Chemoattraktanten auf die Partikel zeitlich zu beschränken. [25] Der Diffusionszerfallparameter (decayT) bestimmt die Rate des räumlichen Werteabfalls der Chemoattraktanten auf der Spurkarte. Durch den Diffusionszerfallparameter kann man die Ausbildung des Gradientenfeldes der abgegebenen Chemoattraktanten, welche die Pfade definieren, bestimmen. Ein niedriger Zerfallswert ergibt ausgeprägte Pfadgrenzen und geringere Konnektivität des Netzwerkes, da die Anziehung der Partikel untereinander dominiert. Zudem gibt der Diffusionszerfallfaktor vor, um wie viel die Chemoattraktanten der Partikel pro Iteration abnimmt. Zusammen mit der Größe der Diffusionskernel (diffK) werden der Einflussbereich der Chemoattraktanten definiert.[25]

4.2.3 Modellmechanismen der Musterbildung ohne Stimuli

Zunächst wurden von Jones das spontane, chemoattraktionsbasierte Musterbildungsverhalten des Partikel-Modells mit den Standardwerten, jedoch ohne zusätzliche Umgebungseinflüsse wie Nahrungsquellen oder Hindernisse untersucht. Die Partikel wurden an zufälligen Positionen erzeugt und die Simulation gestartet. Nach mehreren Iterationen bilden sich Netzwerkpfade, da die Partikel durch die vorwärts gerichteten Sensoren den nächstgelegenen Chemoattraktant-Quellen folgen, welche in der vorherigen Iteration von den Partikel mit erfolgreich vollzogener Bewegung abgegeben wurden. Die Pfadgrenzen werden dabei durch die steil abfallenden Werte der Chemoattraktanten definiert. Jede Bewegung der Partikel verändert dynamisch die Struktur des Netzwerks, was wiederum die Bewegung der benachbarten Partikel in einem komplexen Interaktionszyklus beeinflusst.[25] Der Mechanismus erzeugt eine autokatalytische Verstärkung der Spurpfade. Die Anziehung der Partikel zu gewissen Pfaden führt zu einer geringeren Partikeldichte in anderen Bereichen. Die Netzwerkoptimierung wird somit über die Wechselwirkung einer positive Rückkopplungsschleife und einer negative Rückkopplungsreaktion initialisiert.[26]

Der Partikelfluss entlang eines Pfades ist zudem bidirektional, das bedeutet die Partikel bewegen sich zeitgleich in beide Richtungen innerhalb des Netzwerkes. Kollidieren zwei Partikel, stellt dies eine fehlgeschlagene Vorwärtsbewegung dar. Kollisionen initialisieren eine zufällige Rotation und verhindern somit einen Partikelstau. [26] Obwohl ein einzelner Partikel einen bestimmten Pfad verfolgt, erfolgt das Fortschreiten nicht kontinuierlich, sondern ähnelt dem pulsierenden Plasmastrom vom Schleimpilz durch eine pendelstromartige Bewegungsweise. [25]

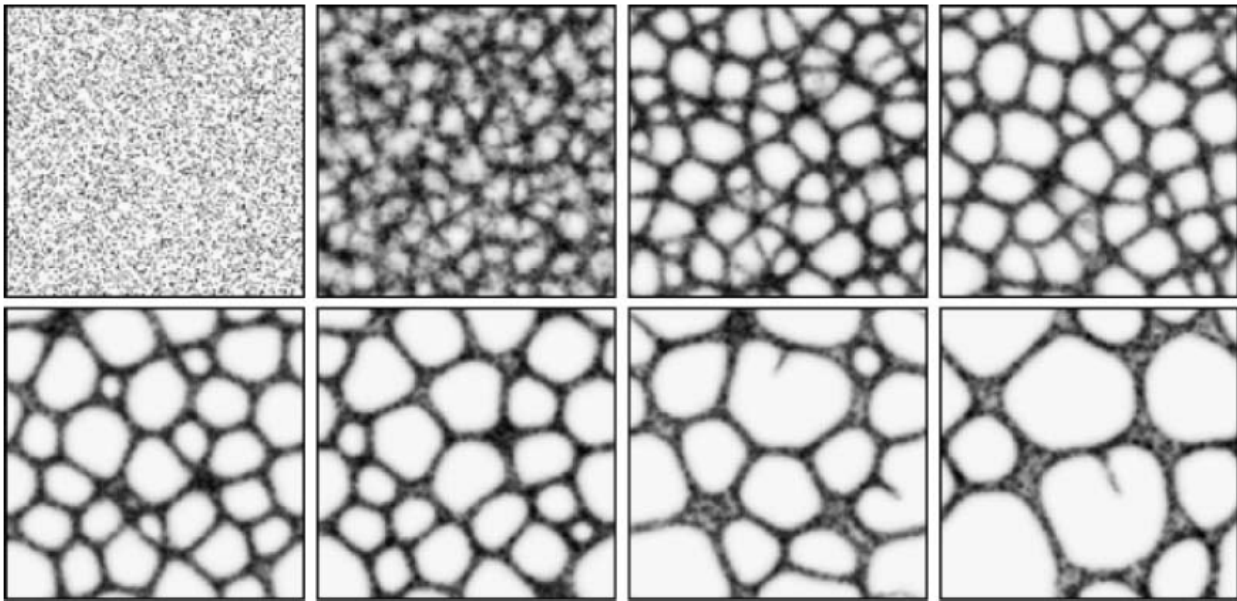


Abb. 4.6: Spontane Musterbildung und -evolution. Gitter 200x200, %p 15, RA 45°, SA 22,5°, SO 9. Spurkarten-Muster, aufgenommen zu den Zeitpunkten 2, 22, 99, 175, 367, 512, 1740 und 4151 Iterationsschritten. [25]

Unterschiedliche parametrische Einstellungen innerhalb des Modells können die Musterbildungseigenschaften des Modells beeinflussen auch ohne den zugrunde liegenden Algorithmus für jeden Partikel zu verändern. Dies führt zu Veränderungen des Ablaufs der Pfadausbildung und der Netzwerkstruktur selbst, auch ohne den Einfluss externer Umweltreize.

Sensorische Parameter

Bei den Versuchen mit Modellen ohne äußere Einflüsse konnten verschiedene Variationen der Netzbildung über die Veränderungen der sensorischen Parameter, Sensorenwinkel und Rotationswinkel, erzielt werden. Bei einem Sensorenwinkel von 45° stellt sich nach einigen Iterationen ein stabiles Pfadnetz mit hexagonaler Musterung und minimaler Pfadlänge ein. Der Partikelfluss versucht ein Gleichgewicht zu erreichen und es entsteht ein internes Konkurrenzverhalten um die Bereiche mit den größten Attraktantenkonzentrationen. Die Flussgeschwindigkeit der Partikel differenziert sich zwischen den inneren und äußeren Pfadbereichen. Die Rate der erfolgreich ausgeführten Bewegungen im Inneren ist aufgrund der hohen Partikeldichte wesentlich geringer als die Erfolgsrate an den Pfadgrenzen. Hierdurch werden die zyklischen Bereiche kontrahiert bis diese geschlossen sind. Verringert man den Sensorenwinkel auf 22,5° hat dies erheblichen Einfluss auf das Verzweigungsverhalten des Partikelflusses. Die Musterbildung enthält mehr Verbindungen, welche sich stetig neu aus bestehenden Pfaden bilden und wieder zurückziehen. Es entsteht weder ein stabiler Gleichgewichtszustand, noch ein minimales Netzwerk. [25]

Die Relation von Sensorenwinkel und Rotationswinkel kann ebenfalls die Netzbildung be-

einflussen. Werden beide Winkel gleich angesetzt (45°), wird das Netzwerk stetig bis zum Gleichgewichtszustand kontrahiert. Dieser Effekt kann durch Verringerung des Rotationswinkels auf einen Wert kleiner des Sensorenwinkels verstärkt werden. Die Betonung liegt auf der Minimierung des Netzwerkes. Wird der Rotationswinkel mit einem größeren Wert versehen, sorgt dies für spontane Verzweigung aufgrund der Platzierung der Sensoren außerhalb des verfolgten Chemoattraktant-Pfads. Hierdurch lässt sich ein Netzwerk mit höherer Konnektivität bilden. Erhöht man den Sensorenwinkel auf 90° formen sich diskrete Partikelinseln und die Netzwerkstruktur löst sich auf.[26]

Skalierender Parameter

Der Abstand (SO) zwischen den Sensoren und dem Partikel beeinflusst proportional die Netzwerkskalierung. Je größer der Wert des Senorenabstands, desto geringer ist der Verzweigungsgrad des Netzes. Die einzelnen Pfade werden breiter und enthalten pro Flächeneinheit eine geringere Anzahl an Partikeln. Verringert man hingegen die sensorische Kopplungsdistanz, verdichtet sich die Partikelmasse innerhalb des Pfadnetzwerkes, welches folglich eine feinere Strukturierung mit dünneren Pfaden aufweist.[25]

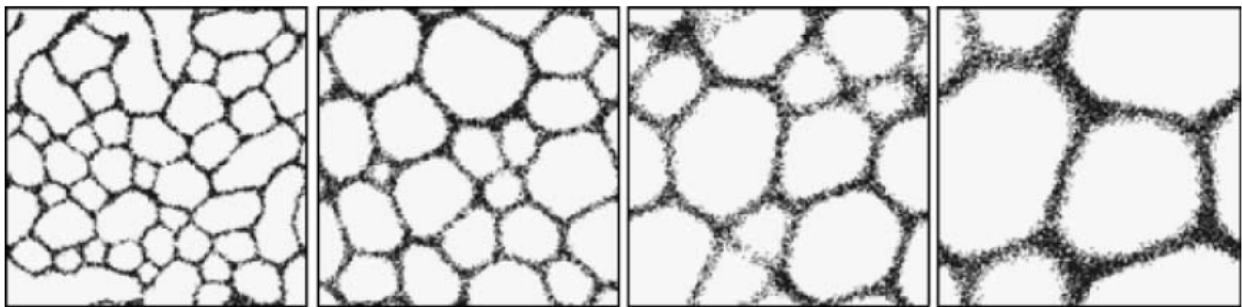


Abb. 4.7: Effekt des Sensorenabstands (SO) auf die Musterbildung und Granularität. Gitter 200×200 , %p 15, SA 45° , RA 45° , 500 Iterationsschritte. Von links nach rechts: Musterbildung mit SO von 3, 9, 15, 25 Pixeln, Partikelpositionen dargestellt. [25]

Populationsgröße

Die Größe der Population (%p) wird als Prozentsatz bezogen auf die Umgebungsgröße angegeben. [26] Da sich immer nur ein Partikel an einer Stelle befinden kann, nimmt eine große Population folglich mehr Fläche ein. Dadurch bilden sich die Pfade dicker aus und es ergeben sich weniger Leerräume. Eine Mindestanzahl an Partikel ist wiederum für die Pfadausbildung notwendig. Die Populationsgröße beeinflusst daher die Musterbildung und die Funktionalität des Modells erheblich. [25] Die richtige Populationsgröße für die betrachtete Problemstellung zu ermitteln, setzt eine gewisse Vorkenntnis über das zu erwartende Ergebnis voraus. Um diesen Umstand zu umgehen, kann mit einer adaptiven Populationsgröße gearbeitet werden.

Zur Beurteilung einer adäquaten Populationsgröße wird in der direkten Umgebung von jedem einzelnen Partikel in jeder dritten Iteration die aktuelle Platzverfügbarkeit analysiert und entweder eine Populationsreduktion oder -wachstum durchgeführt. Für eine Partikelteilung müssen drei Grundlagen erfüllt werden. In einem Bereich von 9x9 Pixel dürfen sich nur zwischen 1 und 10 Partikel befinden. Das Partikel muss zudem zuvor eine erfolgreiche Vorwärtsbewegung durchgeführt haben und es muss sich eine unbelegte Stelle in direkter Nähe befinden. Hierdurch erfolgt Wachstum hauptsächlich an den Randbereichen der Netzwerkpfade. Sollten jedoch in einem Bereich von 5x5 Pixel bereits mehr als 20 andere Partikel eine Position belegen, wird das Partikel aus dem Modell entfernt. Dies verhindert eine Überbevölkerung und stellt sicher, dass die Pfade nicht zu breit werden.[26]

4.2.4 Modellmechanismen der Musterbildung mit vordefinierten Stimuli

Chemoattraktantquellen

Zur gezielten Steuerung der Musterbildung im Partikelmodell werden externe Chemoattraktantquellen als Netzknoten in die Umgebungskarte eingebracht. [25] In Analogie zu experimentellen Ansätzen, bei denen beispielsweise Haferflocken als Nahrungsquellen dienen, werden diese im Modell als konstante Attraktantquellen abgebildet. Die räumliche Positionierung sowie die Ausdehnung dieser Quellen werden explizit in der Umgebungskarte festgelegt.[26] Während jeder Iteration emittieren die Quellen Attraktanten mit definierter Reizstärke an die benachbarten Zellen der Spurkarte, wodurch die Partikel diese chemischen Signale als Reiz aufnehmen können. Die Chemoattraktanten der Knoten werden bei jedem Systemschritt auf die Spurkarte übertragen und diffundieren in gleicher Weise wie die Partikelspuren. Die Intensität der projizierten Reize kann über einen Gewichtungsfaktor manipuliert werden.[25]

Das Verhältnis zwischen der Anziehungskraft der Chemoattraktantquellen und der interpartikulären Wechselwirkung ist entscheidend für die resultierende Musterbildung. Übersteigt die gegenseitige Anziehung der Partikel die Wirkung der Attraktantquellen, verlieren die Knotenpunkte ihren Einfluss auf die Musterbildung. Umgekehrt kann eine zu starke Attraktantwirkung dazu führen, dass die Partikel ausschließlich in der Umgebung der Knoten aggregieren, was die Ausbildung eines Netzwerks verhindert. Daher ist eine sorgfältige Abstimmung der Chemoattraktant-Parameter essenziell, um eine gezielte und stabile Musterbildung im Modell zu gewährleisten.[26]

Modellvariationen

Die Eingabeknoten des Problems wurden im Modell als konstante Chemoattraktantquellen innerhalb des Pfadfelds implementiert, sodass sie für die Partikelpopulation als zugängliche Reizpunkte fungieren. Ziel dieses Ansatzes ist es, das explorative und optimierende Verhalten der Partikel gezielt für die Untersuchung von Netzwerkoptimierungsprozessen zu nutzen. Die Problemlö-

sung manifestiert sich dabei im Endzustand beziehungsweise in einem stabilen, dynamischen Gleichgewichtszustand des emergenten Netzwerks. Zur Analyse der Problemlösungsfähigkeiten solcher selbstorganisierenden Netzwerke hat Jones drei unterschiedliche Strategien entwickelt und untersucht. [26]

Filamentöse Schrumpfung Bei der ersten Methode wird eine geringe Partikelpopulation mit einem Anteil von $\%p = 0,02$ zufällig in der Umgebung verteilt, in der sich Chemoattraktantquellen befinden. Die Orientierung und Position der einzelnen Partikel wird zufällig generiert. Die modellierten Attraktantquellen üben eine gerichtete Anziehung auf die Partikel aus, wodurch diese beginnen, netzwerkartige Strukturen auszubilden. Durch interne Rückkopplungsmechanismen innerhalb des Modells wird der Fluss in den entstehenden Netzwerken kontinuierlich maximiert, indem das Netzwerk seine Struktur anpasst, um den Transport zwischen den Knoten zu optimieren. Im Verlauf mehrerer Iterationsschritte ziehen sich überflüssige Pfadausläufer zurück, bestehende Lücken werden geschlossen und die Verbindungen zwischen den Knoten werden zunehmend linearisiert. Die Netzwerkstruktur strebt dabei einen stabilen Zustand an, in dem die Gesamtlänge der Transportwege minimiert ist. Das Netzwerk, das die Knoten überspannt, ähnelt in den folgenden Beispielen häufig sogenannten Steiner-Minimalbäumen, also der kürzesten Gesamtkonnektivität zwischen den Knoten, gegebenenfalls unter Hinzunahme zusätzlicher Steiner-Punkte zur weiteren Reduzierung der Gesamtlänge des Netzwerks.

Die geringe Populationsgröße bei der filamentösen Schrumpfung führt dazu, dass die zufällige Anfangsverteilung und Ausrichtung der Partikel einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Netzwerkminimierung haben kann. Insbesondere bei Netzwerken mit einer großen Anzahl von Knoten können stochastische Effekte in der Anfangsphase der Netzbildung dazu führen, dass die optimale Minimierung der Netzstruktur nicht in jedem Durchlauf erreicht wird. [26]

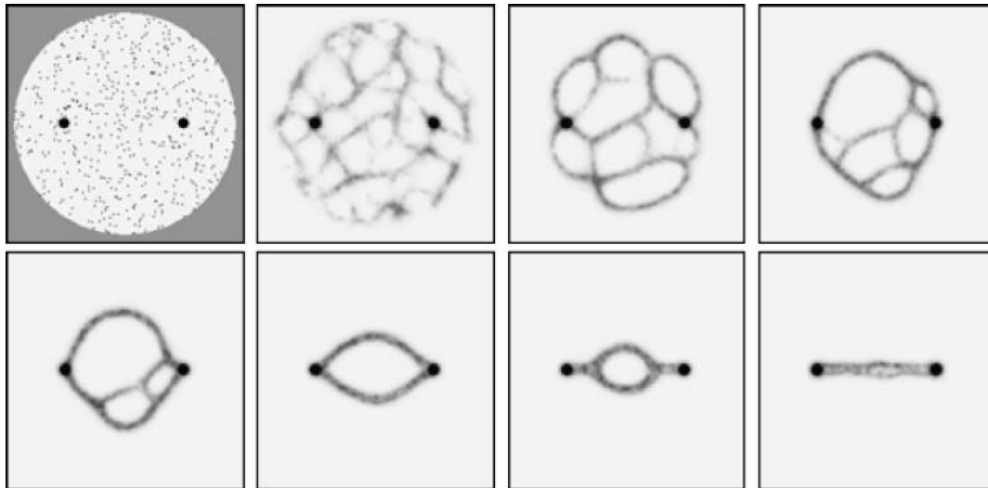


Abb. 4.8: Musterbildung und -evolution unter dem Einfluss vordefinierter Quellen von Chemoattraktanten. Oben links: Die Umgebung zeigt vordefinierte Quellen (dunkle Punkte), anfängliche Partikelpositionen (kleine graue Flecken) und die Grenze der Umgebung (einheitliches Grau). Verbleibende Bilder von links nach rechts: Evolution der Netzbildung (Partikelspuren dargestellt). Die Minimierung des Netzwerks setzt sich fort, bis der kürzeste Weg zwischen den Quellen übrig bleibt. [25]

Filamentöse Sammelmethode Analog zur filamentösen Schrumpfungsmethode wird bei der filamentösen Sammelmethode ebenfalls eine relativ geringe Populationsgröße eingesetzt. Die Partikel werden mit zufälliger Orientierung und Position initialisiert, wobei ihre Startpositionen jedoch ausschließlich auf die Positionen der Knotenquellen beschränkt sind. Aufgrund der begrenzten Fläche an den Knotenpunkten ist eine gleichzeitige Initialisierung der gesamten Population nicht möglich, sodass eine sukzessive Einführung der Partikel in die Umgebung erforderlich ist. Nach ihrer Platzierung verteilen sich die Partikel von den Knoten aus in die Umgebung und etablieren Verbindungen zu den benachbarten Knoten, wodurch die Netzwerkstrukturen entstehen.

Die resultierende Musterbildung hängt maßgeblich von den gewählten Modellparametern ab. Bei kleineren Sensorwinkeln und einem mittleren Rotationswinkel entstehen stark verzweigte, feinmaschige Netzwerke, die sich durch eine kontinuierliche Ausbildung neuer Verzweigungen auszeichnen. Die resultierenden Muster weisen dabei eine hohe strukturelle Ähnlichkeit mit Delaunay-Triangulationen auf. Werden größere Sensorwinkel gewählt, so bilden sich Netzwerkstrukturen aus, die den charakteristischen Minimalpfaden von Steiner-Bäumen entsprechen. Somit lässt sich durch gezielte Parametrierung das Netzwerkverhalten zwischen stark vernetzten und minimalen Strukturen steuern.[26]

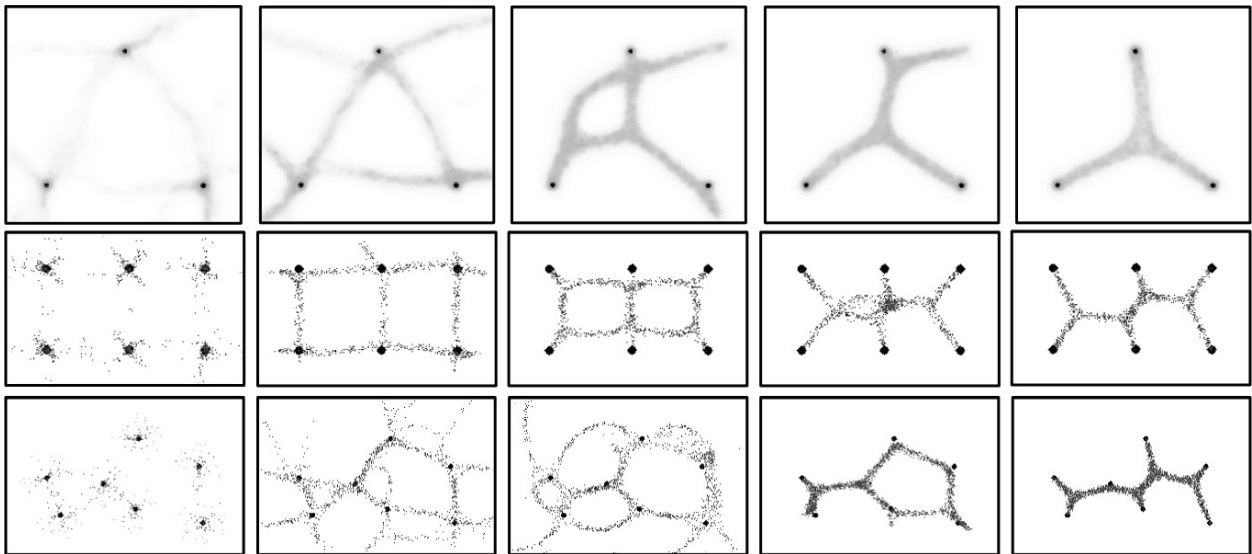


Abb. 4.9: Netzwerkminimierung mittels der filamentösen Sammelmethode [27]

Plasmodiale Schrumpfmethode Die plasmodiale Schrumpfmethode soll die Einschränkungen kleiner Populationsgrößen bei der Netzwerkminimierung überwinden. Die zugrunde liegende Idee für emergente Multipartikel-Netzwerke ist, dass die stochastischen Einflüsse auf die anfängliche Netzwerkbildung, die bei kleinen Populationen problematisch sind, durch die flächendeckende Verteilung einer großen Population abgeschwächt werden. Werden die Partikel anfänglich auf die gesamte Umgebung in sehr hoher Anzahl zufällig verteilt und anschließend mittels Reizquellen stimuliert, lässt sich das Verhalten des Schleimpilzes als Reaktion auf Nahrungsquellen simulieren. Das vorab ausgehungerte Organismus breitet sich zunächst über das gesamte Problemfeld aus und schrumpft dann, um optimale Verbindungen zwischen den Nahrungsquellen aufrechtzuerhalten. Sobald dieser Nahrung findet, wird das Plasmodium verkleinert und diejenigen Adern priorisiert und verdichtet, welche den günstigsten Transportweg darstellen. Ähnlich kann dieser plasmodiale Schrumpfeffekt durch die flächendeckende Verteilung von Partikeln simuliert werden. Für die plasmodiale Schrumpfung ist eine sehr große Populationsgröße erforderlich ($\%p = 0,40$). Die Population wird auf der gesamten Landschaft initialisiert, woraufhin sich ein Transportnetzwerk ausbildet. Die Aktivierung von Chemoattraktantquellen verändert den Umriss der Partikelschicht durch den neuen Einfluss der stärkeren Gradienten. Dieses Netzwerk erscheint zunächst als großflächiges Blatt mit Löchern. Die Löcher schließen sich durch den bereits beschriebenen Mechanismus der Oberflächenminimierung. Das Blatt umfasst nun alle Knotenpunkte.

Der Schrumpfeffekt kann verstärkt werden, indem man langsam bei jeder Iteration die Anzahl der Partikel exponentiell verringert.[25] Durch die graduelle Entfernung konfiguriert sich die Partikelschicht stetig neu, wobei die Spannung der Fläche gleich bleibt und die Oberfläche den minimalen Zustand beibehält. Die Musterbildung approximiert die Optimierung des minimalen

Spannbaumes.[26] Führt man die Partikelreduzierung fort, kann die Minimalstruktur nicht aufrecht erhalten werden, da zu wenige Partikel für eine gleichmäßig dichte Verteilung vorhanden sind. Aus der flächigen Form bilden sich die bereits bei den vorherigen Methoden beobachteten Netzpfade des Steiner-Baumes, welche die künstlichen Nahrungsquellen über direkte Pfade verbinden.[25]

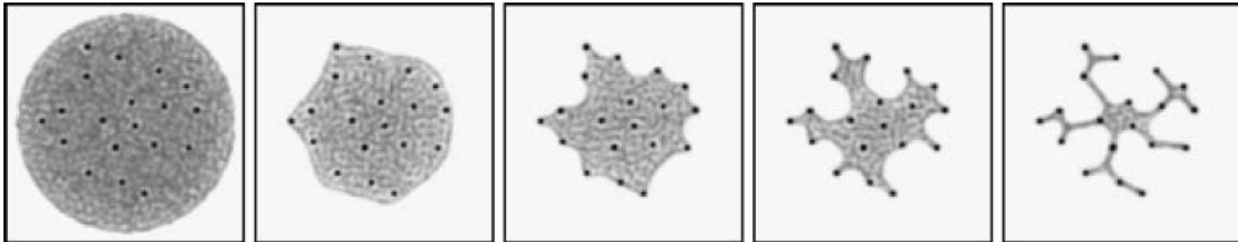


Abb. 4.10: Plasmodiale Schrumpfmethode. Von links nach rechts: Evolution eines Durchlaufs der Schrumpfmethode - das Netzwerk reagiert und passt sich automatisch nach einer Reduktion der Partikelanzahl an. [25]

4.3 Musterbildung als Berechnungsgrundlage

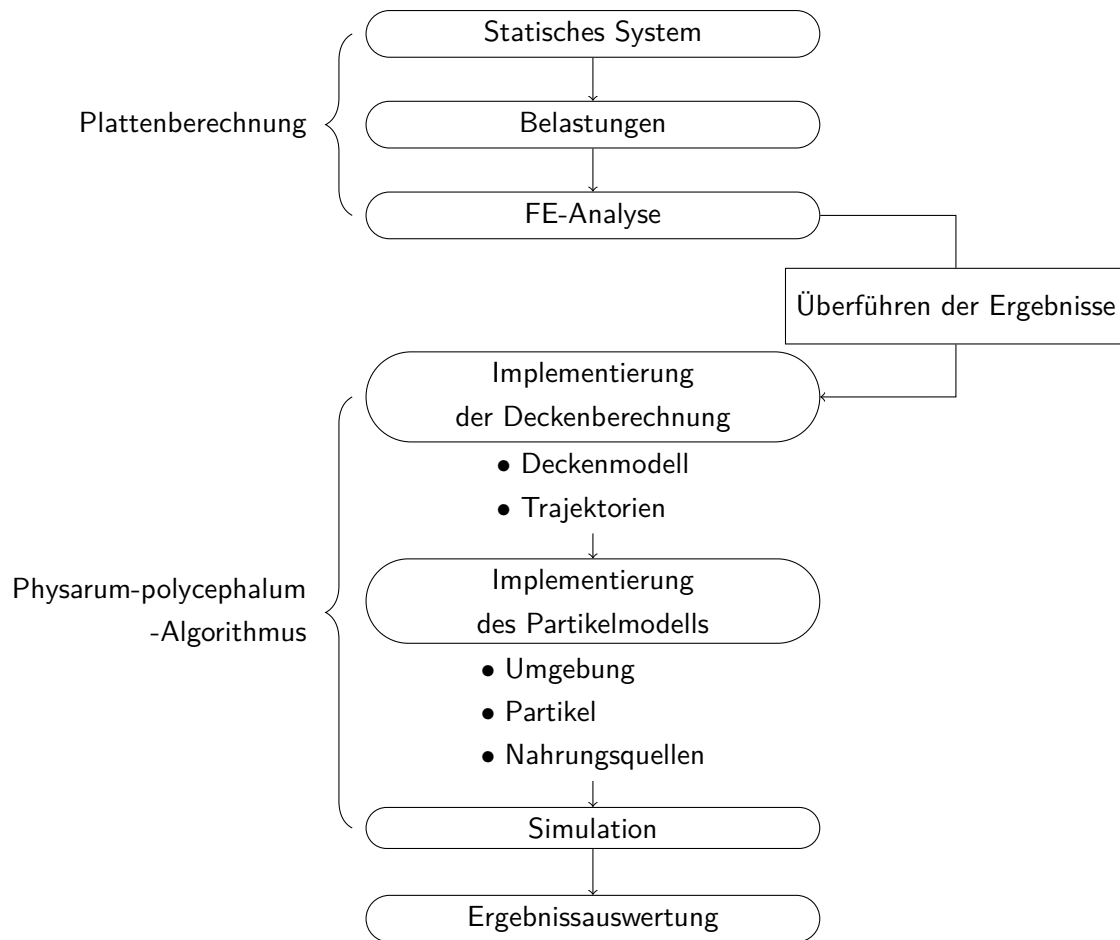
Durch die Übertragung der natürlichen Mechanismen von *Physarum* auf ein partikelbasiertes Modell lassen sich effiziente, selbstorganisierende Lösungsstrategien für verschiedene Optimierungs- und Netzwerkprobleme entwickeln. Obwohl das Verhalten der einzelnen Partikel sehr einfach ist, führt das kollektive Zusammenspiel zu emergenten und komplexen Strukturen, die eine selbstorganisierte Musterbildung zeigen. Die hohe Konnektivität und minimale Pfadlängen in den netzförmigen Mustern stellen wünschenswerte Eigenschaften in vielen Anwendungsgebieten, wie der Plattenbemessung, dar.[25] Es stellt sich die Frage, wie sich die angeborene Musterbildung des Modells sowie die Mechanismen, die sie beeinflussen, für die unkonventionelle Deckenberechnung nutzen lässt. Dazu müssen Probleme ausgewählt werden, die sich in Form räumlicher Muster darstellen lassen. Die Lösung dieser Probleme kann angestoßen werden, indem die beschriebenen elementaren Mechanismen genutzt werden, um die Entwicklung der Partikel-Transportnetzwerke gezielt in Richtung des gewünschten Ergebnisses zu lenken. Die Lösung selbst wird dann durch den stabilen globalen Zustand des Netzwerks repräsentiert.

5 Methodik

Dem Beispiel der Natur folgend, gibt es auch im Bauwesen Bestrebungen minimale Netzwerkstrukturen zu formen. Es soll ein Netz gefunden werden, das den Hauptspannungen folgt.

Im Folgenden wird analysiert, inwieweit der Physarum-polycephalum-Algorithmus zur Spannungsanalyse von Betondecken eingesetzt werden kann, um ein Netzwerk zu generieren, das sich an den Hauptspannungstrajektorien orientiert. Ein solches, an den tatsächlichen Spannungsverläufen ausgerichtetes Netz könnte als Grundlage für eine gezieltere und effizientere Bewehrungsführung dienen als die herkömmliche, meist orthogonale Verlegeweise. Dadurch ließe sich der Materialeinsatz im Betonbau optimieren und sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht reduzieren.

5.1 Ablaufschema



5.1.1 Verwendete Software

RFEM

Für die statische Berechnung wird RFEM 6 herangezogen. RFEM 6 ist eine moderne Finite-Elemente-Software (FEM) von Dlubal für die Tragwerksplanung und Baustatik. Mit dem Programm lassen sich komplexe Strukturen wie Stäbe, Platten, Scheiben, Schalen und Volumenelemente in 2D oder 3D modellieren, berechnen und bemessen. Über die COM-Schnittstelle erfolgt die direkte Ansteuerung der Statiksoftware aus einer angebundene Anwendung. Über diese Schnittstelle können u. a. die Ergebnisse über einen Code ausgelesen werden.

Rhino

Rhino 7 ist eine CAD-Software für das Erstellen, Bearbeiten, Analysieren und Rendern von 3D-Modellen. Grasshopper ist ein in Rhino integrierter visueller Programmiereditor für parametrisches Design. Mit Grasshopper lassen sich komplexe Geometrien und Abläufe durch das Verknüpfen von grafischen Komponenten steuern.

Für das Partikelmodell wird das Plugin Nuclei Version 2.0.0. von Madalin Gheorghe verwendet. Die Mechanik des Physarum-polycephalum-Algorithmus basiert auf der Veröffentlichung "Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks" von Jeff Jones [25].

5.2 Plattenberechnung

5.2.1 Abmessungen und Randbedingung

Für die Evaluierung des Einsatzpotenzials des Physarum-polycephalum-Algorithmus auf Plattentragwerke wird zunächst das zu analysierende Deckentragwerk als ein statisches System in RFEM modelliert. Die Decke weist eine Grundfläche von $4,0 \times 6,0m$ bei einer Dicke von $20cm$ auf. Die Lagerung erfolgt über vier starre Punktlager in den Ecken, sowie drei zusätzlich, innerhalb der Fläche willkürlich angeordnete Punktlager. Das lokale Koordinatensystem der Fläche wurde mit nach unten gerichteter z-Achse definiert, somit entspricht die positive Flächenseite der Unterseite der Decke. Für die Finite-Elemente-Berechnung wird ein Netz mit einer Rastergröße von $0,20 \times 0,20m$ verwendet.

Die statische Analyse erfolgt unter der Annahme eines linear-elastischen, isotropen Materialverhaltens gemäß der Elastizitätstheorie. Die Decke wird als Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 mit einem Elastizitätsmodul von $E = 31.000N/mm^2$ und einer Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ modelliert.

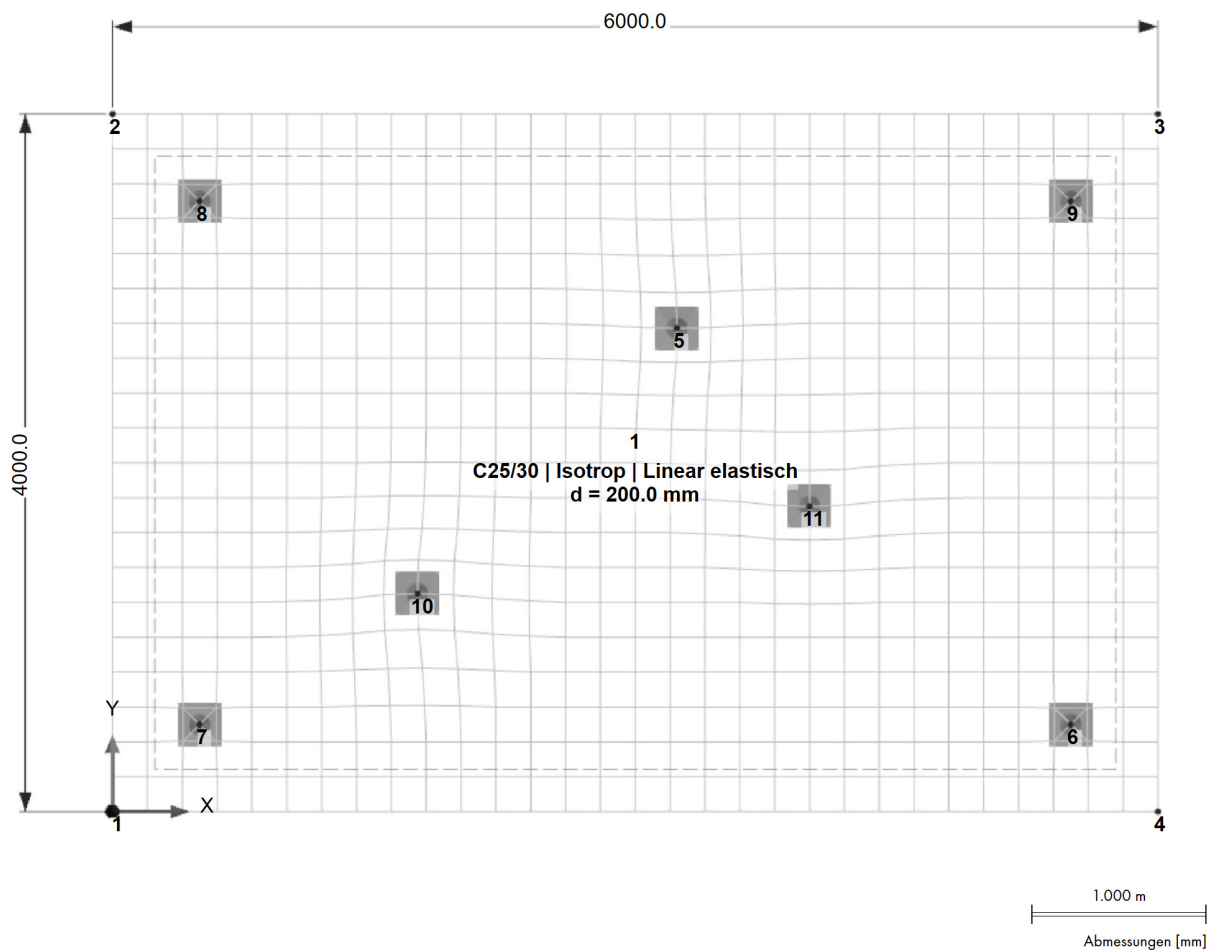


Abb. 5.1: Eingabe des statisches System der Decke in RFEM

5.2.2 Lasten

Die angesetzten Einwirkungen orientieren sich an den für Wohngebäude in Deutschland üblichen Lastannahmen. Das Eigengewicht der Stahlbetondecke wird mit einer Wichte von $\gamma = 25,0 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt und in der FE-Software automatisch entsprechend der jeweiligen Querschnittsgeometrie ermittelt. Für den Bodenaufbau wird pauschal eine charakteristische, gleichmäßig verteilte Flächenlast von $g_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Die Nutzlast wird gemäß DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 Tab. 6.1DE für die Nutzungskategorie A2: Wohn- und Aufenthaltsräume mit $q_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ flächendeckend auf die gesamte Decke aufgetragen. Auf eine feldweise Differenzierung der Nutzlast wird zur Vereinfachung der Berechnung verzichtet. Für die Berechnung wird die Grundkombination der Einwirkungen gemäß DIN EN 1990:2021-10 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) unter Berücksichtigung ständiger und vorübergehender Bemessungssituationen herangezogen. Die Bemessungssituation umfasst vereinfacht nur eine Lastfallkombination und wird wie folgt

kombiniert:

$$BS1 - LK1 : p_d = 1,35 * g_k + 1,50 * q_k \quad (5.1a)$$

5.2.3 FE-Analyse

Basierend auf der in Kapitel 3 dargestellten Plattentheorie nach Mindlin lassen sich die maßgebenden Hauptschnittgrößen m_1 (Maximalwert) und m_2 (Minimalwert) der Decke bestimmen. Die Vorzeichen der Schnittgrößen beziehen sich auf die positive Flächenseite gemäß der Definition des lokalen Koordinatensystems. Positive Werte der Schnittgrößen entsprechen Zugspannungen an der positiven Flächenseite, während negative Werte Druckspannungen anzeigen.

Die berechneten Ergebnisse werden sowohl tabellarisch als auch grafisch für jeden FE-Rasterpunkt ausgegeben.

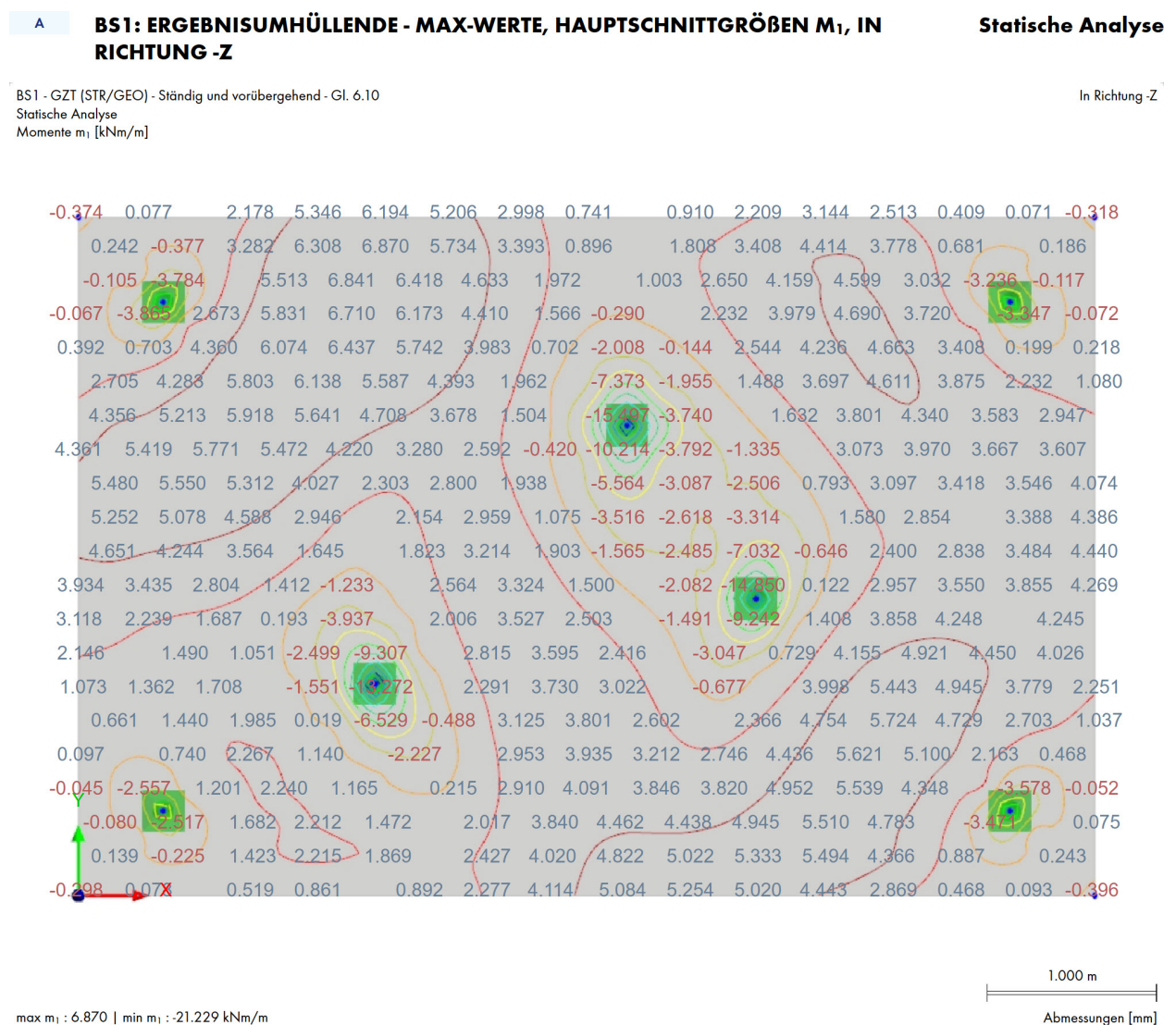
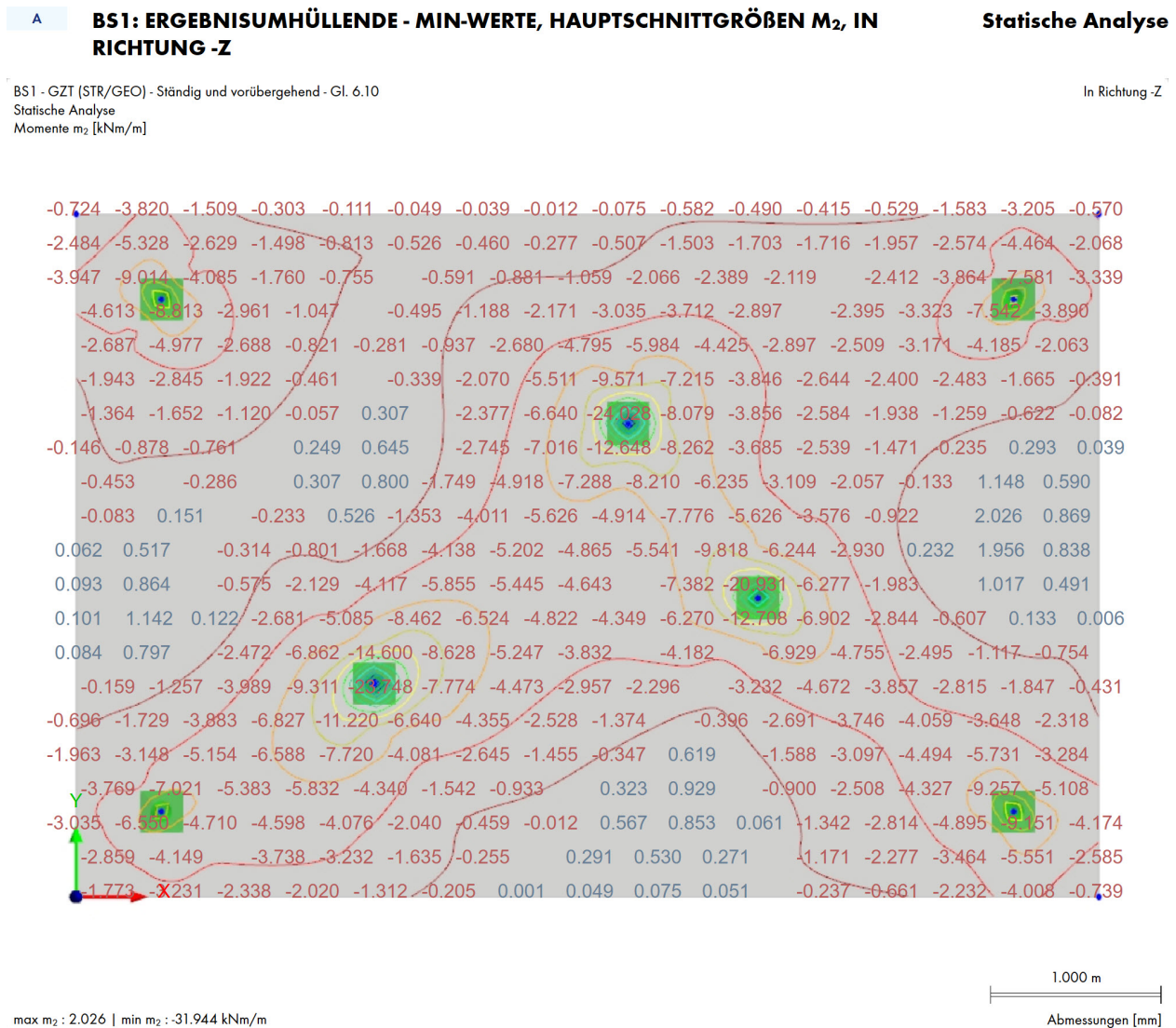


Abb. 5.2: Biegemoment m_1 in Richtung der Hauptachse 1

Abb. 5.3: Biegemoment m_2 in Richtung der Hauptachse 2

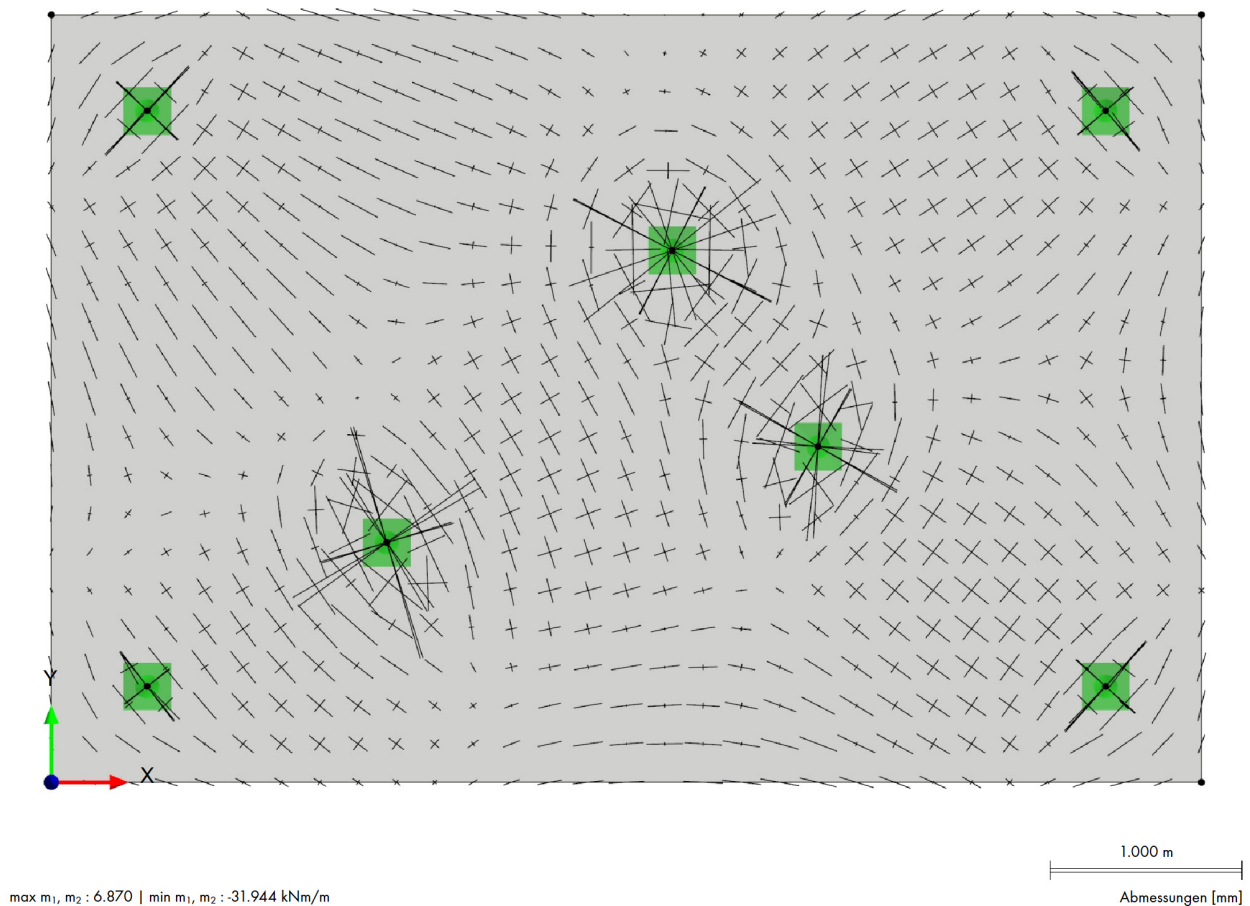
Der Winkel α_b beschreibt die Orientierung der Hauptachse 1 relativ zur lokalen x-Achse der Fläche. Die beiden Hauptachsen 1 (zugehörig zum Maximalwert der Schnittgröße) und 2 (Minimalwert) sind stets orthogonal zueinander angeordnet und ergeben sich durch Transformation der Grundschnittgrößen in die Richtungen maximaler und minimaler Beanspruchung. Ein positiver Wert von α_b kennzeichnet eine Drehung der Hauptachse 1 im Uhrzeigersinn gegenüber der lokalen x-Achse. Die Richtung der Hauptschnittgrößen variiert über die Fläche. Der Verlauf der Hauptachsen sowie die zugehörigen Hauptschnittgrößen können zur Visualisierung des inneren Kraftflusses im Tragwerk herangezogen werden, indem sie als Trajektorien dargestellt werden.

A

BS1: ERGEBNISUMHÜLLENDE - MAX-WERTE, HAUPTSCHNITTGRÖßEN α_b , IN RICHTUNG -Z**Statische Analyse**

BS1 - GZT (STR/GEO) - Ständig und vorübergehend - Gl. 6.10
 Statische Analyse
 Winkel m_1, m_2 [kNm/m]

In Richtung -Z

Abb. 5.4: Winkel α_b zwischen der lokalen Achse x (bzw. y) und der Hauptachse 1 (bzw. 2)

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden exemplarisch die Werte an den Rasterpunkten 304, 305, 335 und 336 ausgegeben.

BS1: Hauptschnittgrößen

Rasterpunkt Nr.	Rasterpunkt-Koordinaten [m]			Momente [kNm/m]		
	X	Y	Z	m1	m2	α_b
304	4,80	2,20	0,00	2,512	-0,922	-14,85
305	5,00	2,20	0,00	2,854	0,359	-16,26
335	4,80	2,00	0,00	2,400	-1,205	4,52
336	5,00	2,00	0,00	2,810	0,232	8,59

Tab. 5.2: Ergebnisswerte an den Rasterpunkten 304, 305, 335 und 336

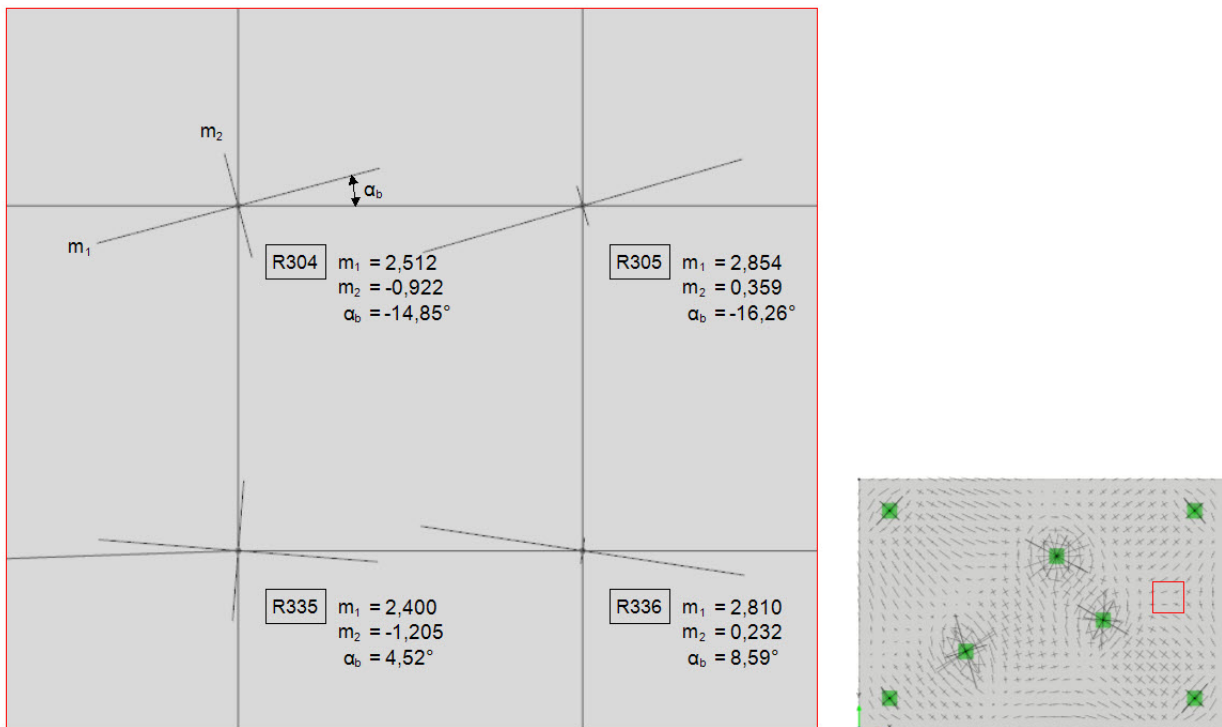


Abb. 5.5: Ergebnisswerte an den Rasterpunkten 304, 305, 335 und 336

5.2.4 Ergebniswertkonvertierung

Die Ergebnisse der FE-Berechnung werden nun über die API ausgelesen. Hierfür wurde ein einfacher Python-Code verfasst. Dieses Python-Skript dient der automatisierten Durchführung der FE-Berechnung sowie dem anschließenden Export der Ergebnisse aus RFEM. Zunächst wird das bereits vollständig definierte Modell geladen und für Modifikationen geöffnet. Im Anschluss daran wird die Berechnung des Modells angestoßen. Nach Abschluss der Berechnung erfolgt der Export der relevanten Ergebnistabellen im CSV-Format in ein angegebenes Verzeichnis. Abschließend wird die Modifikationssitzung beendet und das Modell geschlossen. Auf diese Weise können die Berechnungsergebnisse effizient und reproduzierbar aus RFEM extrahiert und zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt werden.

5.1: Client-Application

```

1 from RFEM.enums import *
2 from RFEM.Results.resultTables import *
3 from RFEM.initModel import *
4 from RFEM.ImportExport import *
5 from RFEM.Reports.html import ExportResultTablesToCSV
6 if __name__ == "__main__":
7     Model(False, "Modellname")
8     Model.clientModel.service.begin_modification("Modellname")
9     Calculate_all()

```

```
10     ExportResultTablesToCSV(r"Pfad-zur-Ablage")
11     Model.clientModel.service.finish_modification("Modellname")
```

5.3 Physarum-polycephalum-Algorithmus

Im folgenden Abschnitt werden die erforderlichen Eingaben und Konfigurationen im Grasshopper-Modell systematisch erläutert, die für die Anwendung des Physarum-polycephalum-Algorithmus auf Plattentragwerke notwendig sind. Dabei steht nicht die detaillierte Beschreibung einzelner Komponenten im Vordergrund, sondern die Darstellung des grundlegenden methodischen Vorgehens.

Die zur Steuerung des Modells verwendeten Parameter sind durch rote Markierung hervorgehoben.

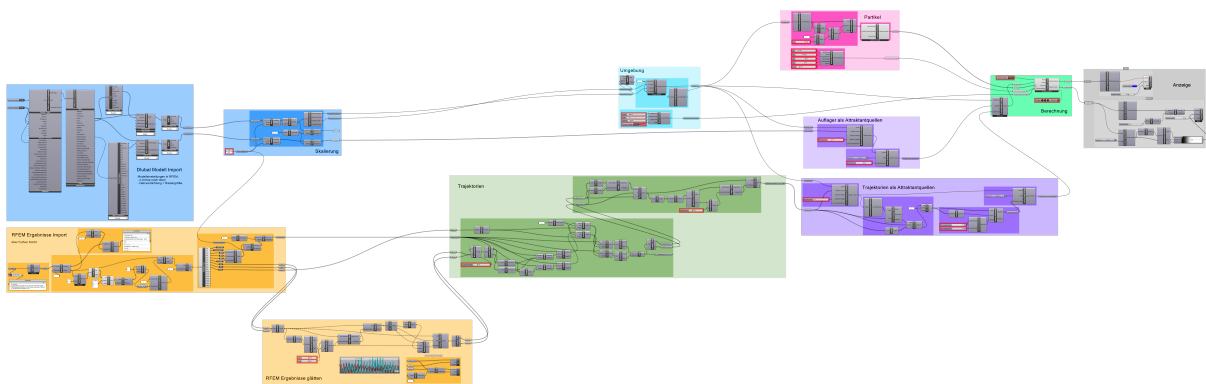


Abb. 5.6: Übersicht: Modellierung des Partikelmodells für Plattentragwerke in Grasshopper

5.3.1 Implementierung der Deckenberechnung

Deckenmodell einlesen

Die Modellgeometrie des Deckensystems wird zunächst aus RFEM nach Grasshopper übertragen. Hierfür steht in Grasshopper ein spezielles Plugin zur Verfügung, das bei gleichzeitig geöffneten Anwendungen den direkten Import von Modelldaten ermöglicht. Für die Rekonstruktion des Modells in Grasshopper werden insbesondere die Knoten der Umfassungslinien der Deckenfläche sowie die Koordinaten der Knotenlager benötigt. Auf Basis dieser importierten Geometriedaten kann das Deckensystem in Grasshopper nachgebildet werden.

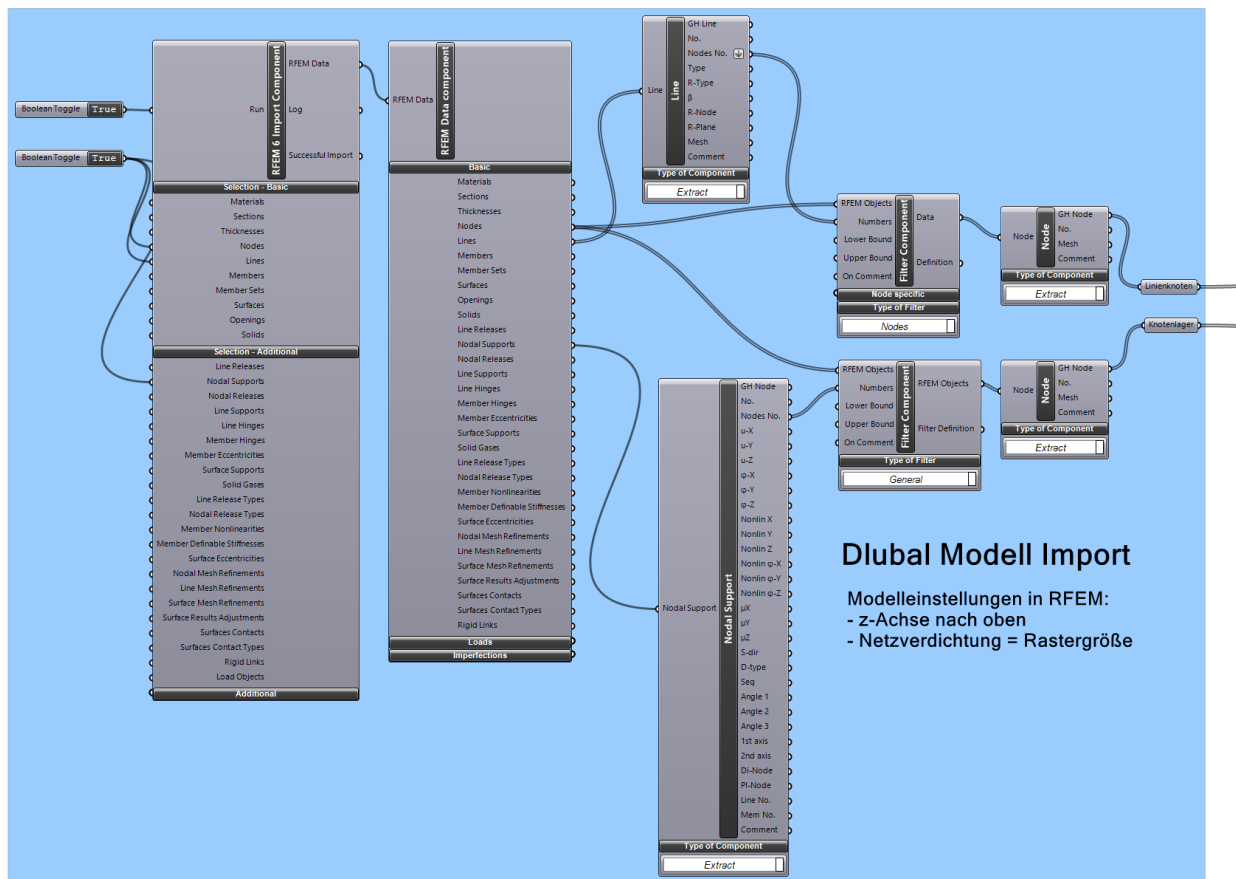


Abb. 5.7: Import der RFEM-Modelldaten

Im Plugin Nuclei wird als Grundeinheit ein Voxel definiert, dessen Dimension einer Systemeinheit in Grasshopper entspricht. Um ein geeignetes Verhältnis zwischen Partikelgröße (repräsentiert durch ein Voxel) und der Modellumgebung sicherzustellen, muss das Deckenmodell in der x- und y-Ebene skalierbar ausgeführt werden. Zusätzlich wird die xy-Ebene des aus RFEM importierten Modells um eine halbe Systemeinheit in negativer z-Richtung verschoben, sodass sie mit der Ebene des Partikelmodells in Nuclei übereinstimmt.

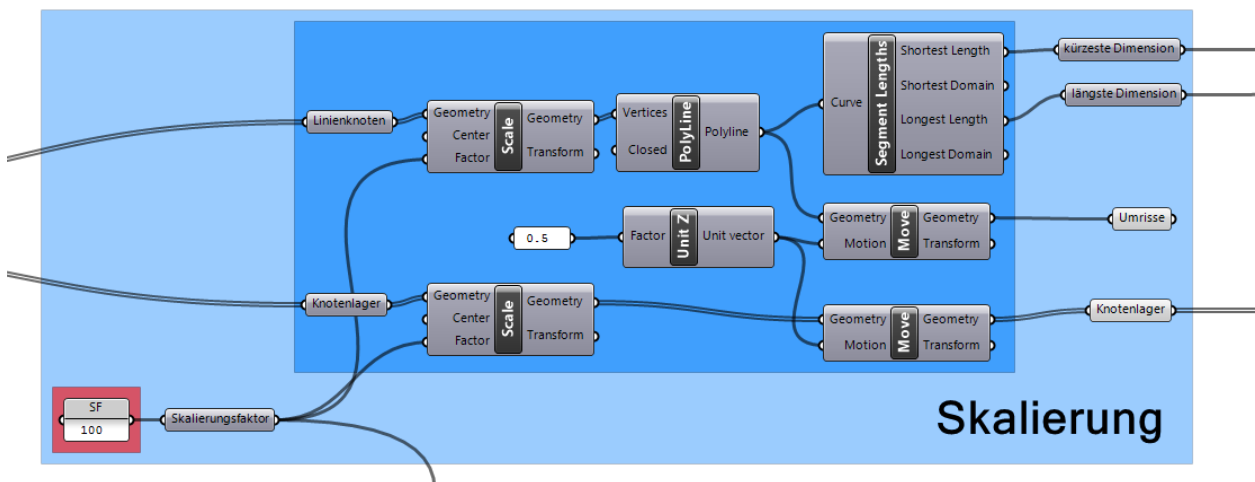


Abb. 5.8: Skalierung der RFEM-Modelldaten

Hauptmomente als Trajektorien konvertieren

Im Rahmen der weiteren Auswertung werden die aus der erzeugten CSV-Datei exportierten Ergebnisse direkt als Datenstruktur in Grasshopper eingelesen. Vor der Weiterverarbeitung erfolgt eine Bereinigung der Datenstruktur, bei der Kopfzeilen und nicht relevante Textbestandteile entfernt werden. Anschließend werden die X-, Y- und Z-Koordinaten der Rasterpunkte extrahiert und zur Definition der Rasterpunkte im Grasshopper-Modell verwendet. Diese Punkte werden analog zum restlichen Modell skaliert und in die Bezugsebene verschoben.

Die zugehörigen Werte der Hauptschnittgrößen m_1 und m_2 , sowie die Werte des Hauptachsenwinkels α_b werden als separate Datensätze geführt.

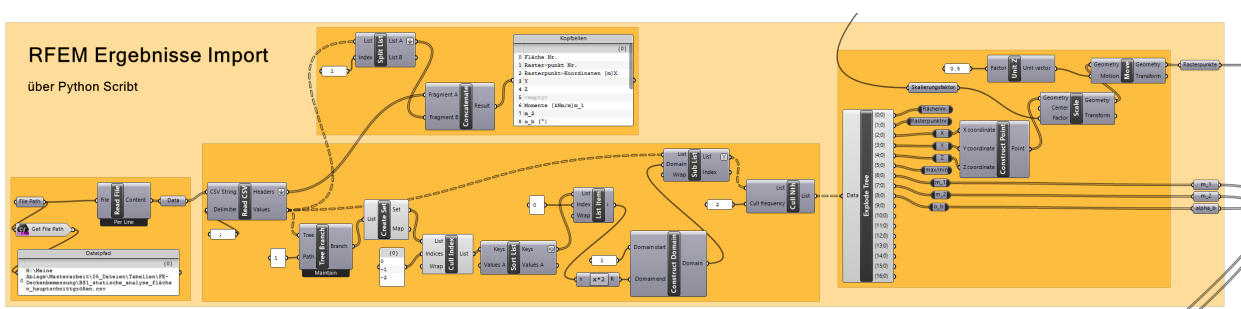


Abb. 5.9: Einlesen der Ergebniswerte aus der CSV-Datei

Da bei FE-Berechnungen lokale Singularitäten zu unrealistisch hohen Spitzenwerten der Hauptschnittgrößen führen können, werden sämtliche Werte, die einen vorab festgelegten prozentualen Schwellenwert überschreiten, auf diesen Grenzwert reduziert. Hierfür wird ein Wertebereich definiert, innerhalb dessen alle Werte oberhalb des festgelegten Prozentsatzes auf

den entsprechenden Schwellenwert gesetzt werden. Auf diese Weise werden die Auswirkungen numerischer Singularitäten auf die weitere Auswertung der Ergebnisse gezielt reduziert. Die somit geglätteten Datensätze werden fortführend m'_1 und m'_2 bezeichnet.

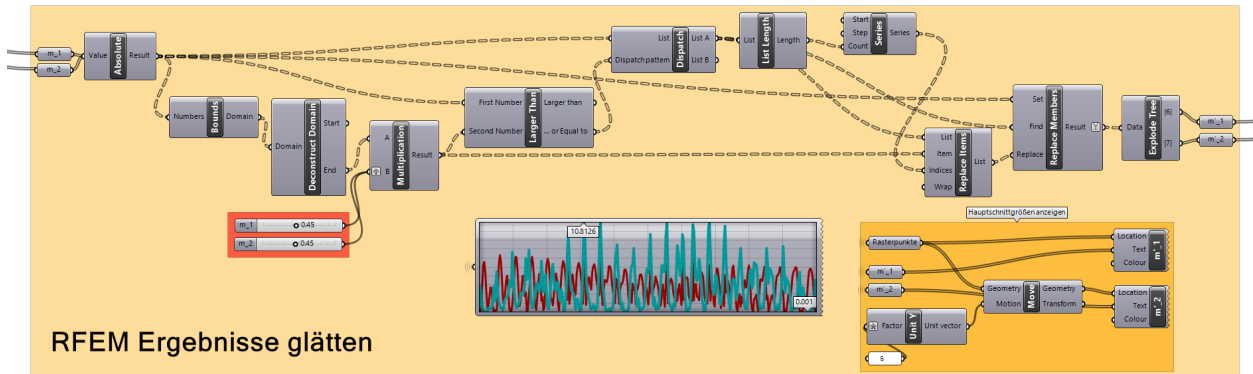


Abb. 5.10: Glätten der Singularitäten aus der FE-Bemessung

Zur Erzeugung der Trajektorien der Hauptmomente wird an jedem Rasterpunkt jeweils ein Vektor in X- und Y-Richtung mit einer Länge entsprechend dem halben Wert der jeweiligen Hauptchnittgröße erzeugt. Beide Vektoren werden um den zugehörigen Winkel α_b gedreht, wobei der jeweilige Rasterpunkt den Drehpunkt darstellt. Zur vollständigen Darstellung der Trajektorien werden die Vektoren gespiegelt und die Endpunkte zu Linien verbunden. Die Länge dieser Linien, und damit der Trajektorien, kann proportional über einen Skalierungsfaktor angepasst werden.

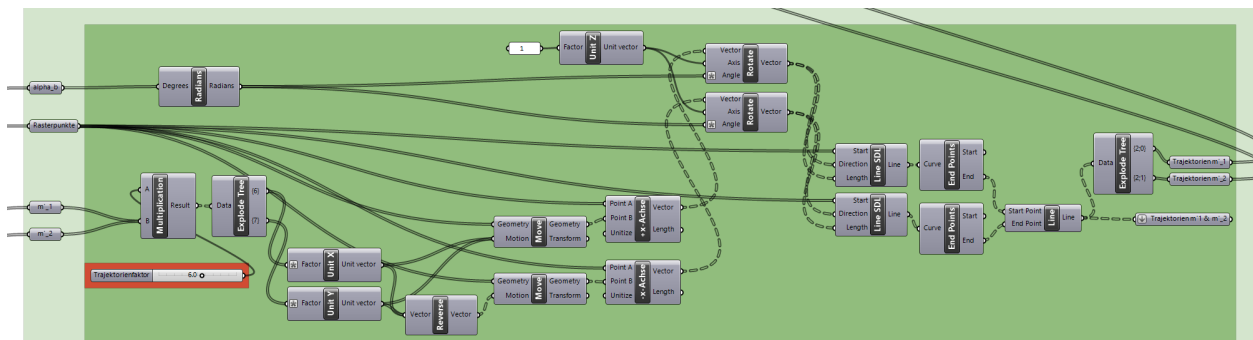


Abb. 5.11: Erzeugung der Trajektorien der Hauptmomente

Im Anschluss wird für jeden Rasterpunkt die Trajektorie mit dem betragsmäßig größeren Hauptmoment ausgewählt. Das Trajektorienfeld wird zusätzlich dahingehend reduziert, dass nur solche Trajektorien dargestellt werden, deren Wert einen zuvor festgelegten minimalen Grenzwert überschreitet. Dieser Grenzwert wird prozentual in Bezug auf den Wertebereich der berechneten Hauptmomente definiert.

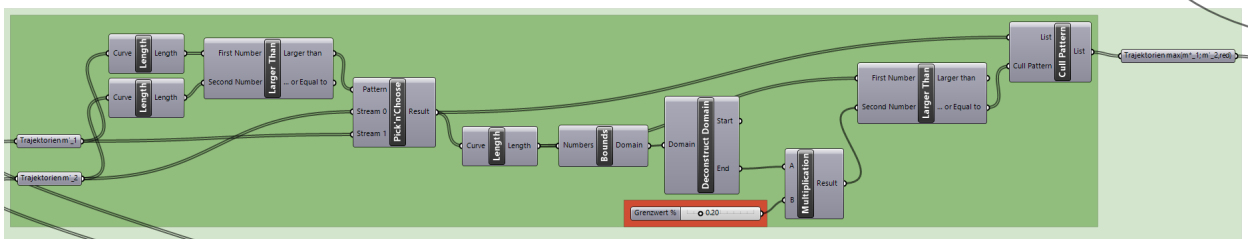


Abb. 5.12: Filtern des Trajektorienfeldes

Das resultierende Trajektorienbild erstellt ein repräsentatives Kraftflussbild der Decke, das die maßgebenden Hauptmomente für die weitere Auswertung enthält.

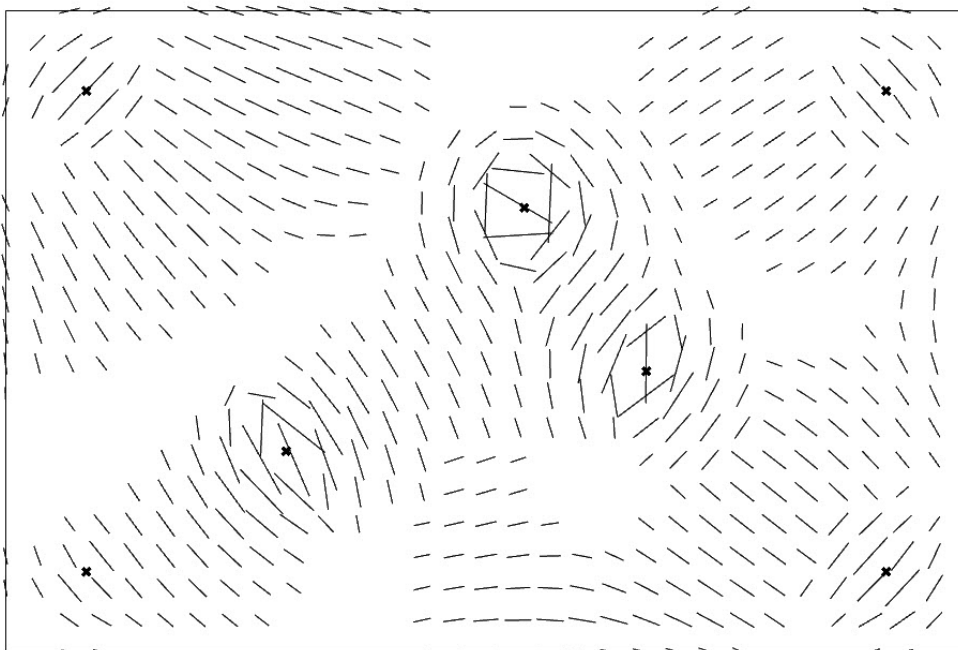


Abb. 5.13: Trajektorienfeld

5.3.2 Implementierung des Partikelmodells

Definition der Umgebung

Das Partikelmodell benötigt zunächst eine Definition des zweidimensionalen Simulationsraumes. Hierzu werden die aus RFEM-importierten und skalierten Deckenränder als Begrenzung verwendet. Die gesamte Modellfläche wird anschließend durch ein homogenes Raster aus Voxeln vollständig diskretisiert.

Das verwendete Plugin ermöglicht die gezielte Steuerung der von Jeff Jones implementierten Umwelteffekte der Diffusion und Verdunstung. Diese Prozesse lassen sich über die Parameter

der Diffusionsreichweite ($diffK$) und des Projektionsgrades ($wProj$), sowie des Zerfallfaktors ($decayT$) der abgelegten Chemoattraktanten anpassen.

Das Voxelraster an den Rändern wird periodisch bei aktiviertem Schalter fortgesetzt. Überschreiten Partikel die Umgebungsränder, erscheinen diese auf der gegenüberliegenden Seite wieder. Dadurch entsteht ein nahtloser Übergang, als wäre das Voxelraster endlos miteinander verbunden. Ist der Schalter deaktiviert, stellen die Ränder harte Begrenzungen dar, an denen Partikel gestoppt oder reflektiert werden.

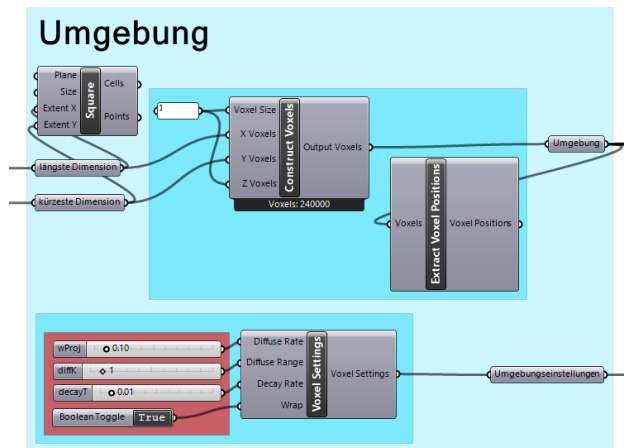


Abb. 5.14: Definition der Umgebung und der Umwelteffekte mittels der Parameter $wProj$, $diffK$, $decayT$

Generierung der Partikel

Für die Generierung der Partikel wird die plasmodiale Schrumpfungsmethode nach Jeff Jones ohne adaptive Partikelreduktion angewendet. Die Populationsgröße ($\%p$) kann dabei prozentual zur Fläche der Umgebung festgelegt werden. Die Partikel werden mit zufällig erzeugten Positionen und Orientierungen gleichmäßig über die gesamte Modellumgebung verteilt.

Die von Jeff Jones eingeführten Parameter zur Partikelmorphologie (SS , SO , SA und RA) sind manuell einstellbar. Die Abgabemenge der Chemoattraktanten eines einzelnen Partikels bei einer erfolgreich ausgeführten Bewegung in die Umgebung pro Systemschritt kann über den Parameter $depT$ gewählt werden.

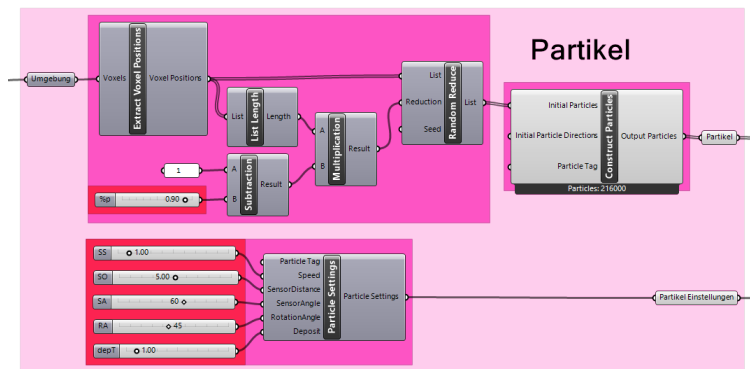


Abb. 5.15: Definition der Partikel mittels der Parameter SS , SO , SA und RA unter Angabe der Populationsgröße $\%p$ und der Abgabemenge der Chemoattraktanten $depT$

Ergänzen der Nahrungsquellen

Die Grundlage für die Netzbildung im Partikelmodell bilden die definierten Nahrungs- bzw. Chemoattraktantquellen. Zur Abbildung des Kraftflusses im Deckensystem werden sowohl die Knotenlager als auch die gefilterten Trajektorien als Quellen herangezogen.

Zunächst werden die Voxel in einer festgelegten Bereichsweite um die Auflagerknoten identifiziert. Diese werden dem Definitionstyp *Food* zugeordnet und mit einem Multiplikator versehen, welcher den Einflussgrad der Nahrungsquellen auf das Partikelverhalten steuert.

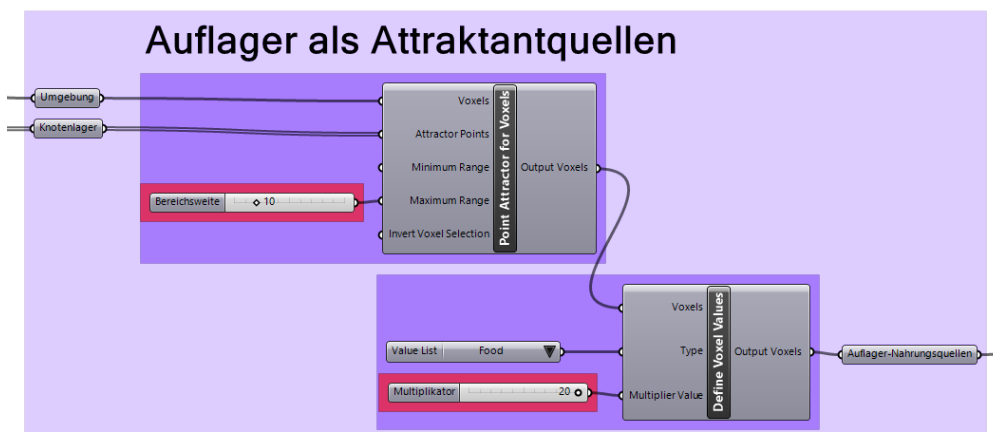


Abb. 5.16: Implementierung der Auflager als Chemoattraktantquellen

Zur Integration der Trajektorien in das Netzwerk werden diese ebenfalls als Nahrungsquellen angesetzt. Hierfür werden diese als Linienattraktanten definiert, indem die Voxel im unmittelbaren Umfeld anhand des minimalen Abstands zur Linie der jeweiligen Trajektorienlinie zugeordnet werden. Diese Voxel werden ebenfalls dem Typus *Food* zugeordnet. Der Multiplikator für diese Voxel wird proportional zur Linienlänge vergeben, die wiederum den Wert des jeweiligen

Hauptmomentes widerspiegelt. Vorab werden die Werte innerhalb eines definierten Wertebereich neu verteilt, um den Einflussgrad der Chemoattraktanten auf die Partikel gezielt steuern zu können. Voxel, denen keine Quelle zugeordnet werden kann, erhalten den Wert -1 .

Die Kombination aus Knotenlagern und Trajektorienlinien bildet somit die Grundstruktur, an welcher sich die Partikel während der Netzbildung orientieren.

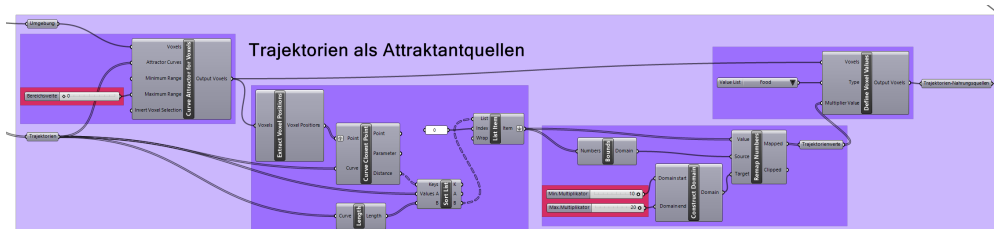


Abb. 5.17: Implementierung der Trajektorien als Chemoattraktantenquellen

Durchführung der Partikelsimulation

Alle Einstellungen und Eingaben der Voxel und Partikeln dienen als Eingangswerte für das zentrale Berechnungsmodul. Dieses führt die Simulation des Partikelmodells durch. Dieses ist als nebenläufiger Simulationskern implementiert, was bedeutet, dass die Berechnungen parallel auf mehreren Prozessorkernen ausgeführt werden können, um komplexe Simulationen effizient zu berechnen.

Das Berechnungsmodul enthält den grundlegenden Physarum-polycephalum-Algorithmus für die Durchführung der Partikelsimulation. Zunächst werden die Partikel in der Umgebung erzeugt, anschließend werden für jede Iteration die Zustände aller Partikel und die Wechselwirkungen berechnet. Nach jeder Iteration wird die Simulation aktualisiert, wodurch sich die dynamische Musterbildung entwickelt. Die Berechnung wird durch Deaktivierung des Berechnungsmoduls manuell nach einer beliebigen Anzahl an Iterationen beendet.

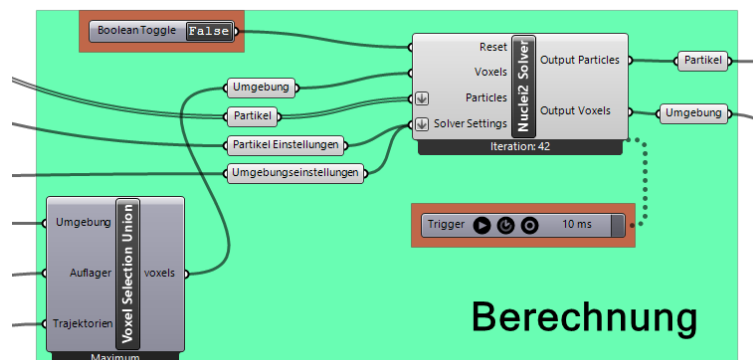


Abb. 5.18: Berechnungsmodul für die Durchführung der Partikelsimulation

5.3.3 Modellvalidierung

Zunächst sollen die Modellmechanismen des Partikelmodells ohne die Trajektorien als Chemoattraktantenquellen auf seine Richtigkeit geprüft werden. Es wurden lediglich die Auflagerpunkte als Netzknoten definiert. Hierfür wurden folgende Parameter eingegeben:

Validierungsmodell - Parameter		
Parameter	Bezeichnung	Wert
FE-Modell	Netzgröße	0,2
	Skalierungsfaktor	30
Umgebung	Dimensionen	180x120 Voxel
	$wProj$	0,1
	$diffK$	1
	$decayT$	0,01
	Begrenzung	Geschlossen
Partikel	$\%p$	0,5
	SS	1
	SO	5
	SA	60°
	RA	45°
	$depT$	1
Auflager	Bereichsweite	5
	Multiplikator	10

Tab. 5.4: Validierungsmodell - Parameter

Das Modell weist die von Jeff Jones beschriebenen Mechanismen der selbstorganisierten Musterbildung auf. Bereits in den ersten Iterationen bildet sich ein stark verzweigtes, noch wenig strukturiertes Netzwerk aus. Mit fortschreitender Simulation konsolidieren sich die Pfade zunehmend, und kleinere Netzmaschen verschmelzen zu größeren Strukturen. Die Verbindungen zwischen den Auflagerpunkten werden mit jeder weiteren Iteration klarer und differenzierter herausgearbeitet. Nach etwa 1000 Iterationen stellt sich ein stabiler Gleichgewichtszustand ein, in dem die resultierenden Pfade ein effizientes, minimales Transportnetzwerk zwischen den Auflagerpunkten abbilden. Dieses Netzwerk entspricht in seiner Struktur einem minimalen Verbindungsgraphen, der die wesentlichen Transportwege optimal miteinander verknüpft und so die charakteristische Optimierungsfähigkeit des Modells demonstriert.

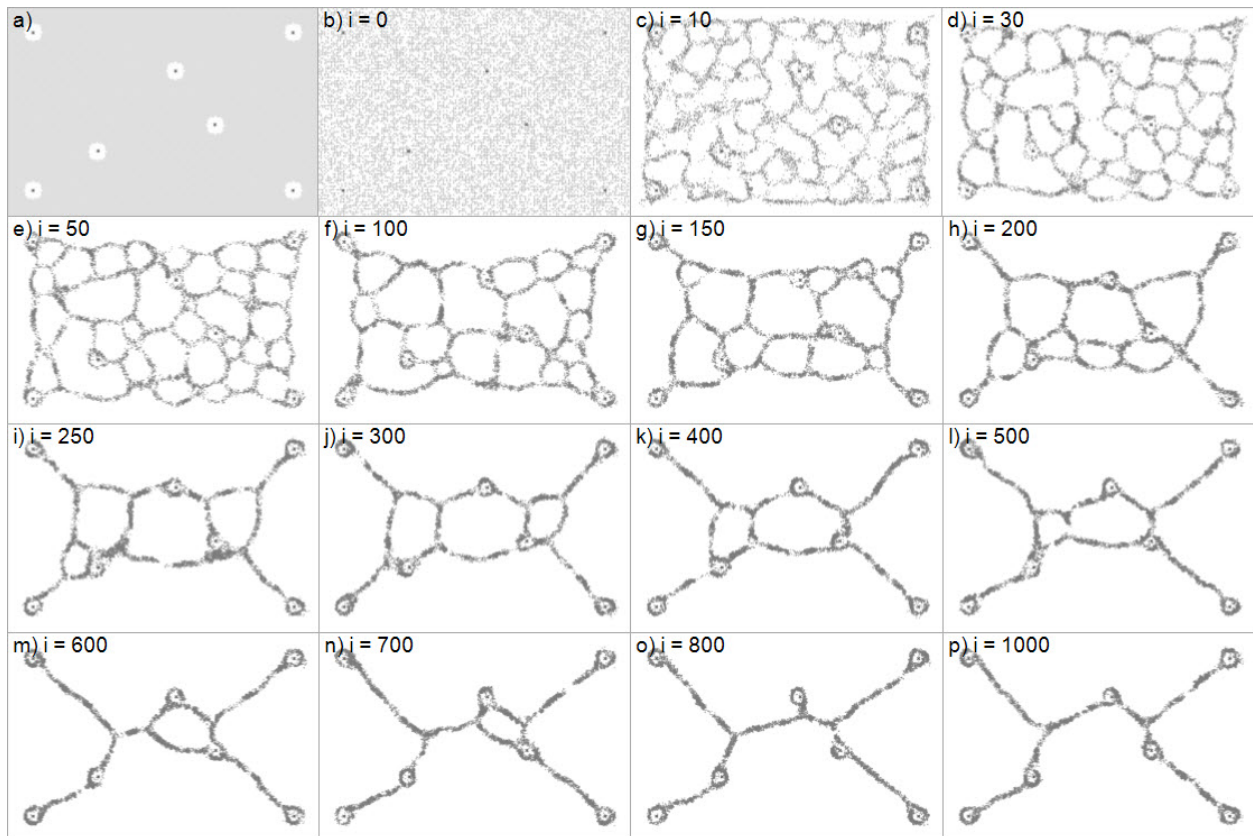


Abb. 5.19: Validierungsmodell: a) Spurkarte; b) Initiale Platzierung der Partikelpopulation; c)- o) Entwicklung der Musterbildung in ausgewählten Iterationen; p) Minimales Transportnetzwerk im Gleichgewichtszustand bei Iteration $i = 1000$

6 Plattenanalyse

6.1 Modellkonfiguration und Parameterwahl

Das Modell wurde unter Verwendung der Trajektorien als Chemoattraktantquellen mit verschiedenen Parametersätzen untersucht, um eine möglichst ausgeprägte und eindeutige Netzbildung zu erzielen, bei der die Trajektorien als Leitlinien für die Partikelbewegung dienen. Ziel war es, durch Variation der Modellparameter jene Kombination zu identifizieren, die zu einer klaren und strukturierten Ausprägung des resultierenden Netzwerks entlang der vorgegebenen Trajektorien führt.

Die Auswahl der optimalen Parameter erfolgte auf Basis einer systematischen Parameterstudie, bei der verschiedene Kombinationen der relevanten Modellgrößen getestet wurden. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte anhand der Klarheit und Eindeutigkeit der ausgebildeten Netzwerkstrukturen entlang der vorgegebenen Trajektorien.

Skalierung und Rasteranpassung

Die Skalierung des Systems wurde so gewählt, dass die Trajektorien im Verhältnis zum Voxelraster eine hinreichend hohe Auflösung aufweisen, um die räumliche Ausrichtung der Hauptachsen eindeutig abzubilden. Dies gewährleistet, dass die Trajektorien als Leitstrukturen für die Partikelbewegung klar erkennbar bleiben.

Randbedingungen und Umwelteffekte

Zur Vermeidung von Randeffekten und zur Berücksichtigung der Randmomente wurde die periodische Randbedingung implementiert. Für die Modellierung der Diffusion und Verdunstung der Chemoattraktanten wurden die Standardparameter nach Jeff Jones übernommen. Lediglich die Größe der Diffusionskernel wurde auf ein Minimum reduziert, um einen steileren Konzentrationsgradienten zu erzeugen. Dies begünstigt eine lokal eng begrenzte und präzisere Pfadausbildung entlang der Trajektorien.

Populationsgröße

Eine Populationsgröße von $\%p = 0,90$ stellt ein ausgewogenes Verhältnis dar, das eine gleichmäßige Verteilung der Partikel sowie eine differenzierte Ausbildung der Pfadstrukturen gewährleistet. Ist

die Population zu groß, bildet sich ein nahezu flächendeckendes Netzwerk aus, jedoch ohne klar erkennbare Pfadstrukturen. Stattdessen entsteht eine homogene, teppichartige Verteilung mit Lücken, sodass die für das Modell charakteristische Ausbildung von Pfaden weitgehend ausbleibt. Eine zu kleine Population resultiert in einem fragmentierten, unvollständigen Netzwerk, da die Partikelanzahl für eine kontinuierliche Pfadbildung unzureichend ist.

Partikelparameter

Die Parameter zur Steuerung des Partikelverhaltens wurden heuristisch optimiert, um eine maximale Übereinstimmung zwischen der simulierten Netzbildung und den vorgegebenen Trajektorien zu erreichen. Dieser empirische Ansatz erlaubte eine feine Abstimmung der Selbstorganisationsdynamik auf die gewünschten Leitlinien.

Trajektorienkonfiguration

Die Konfiguration der Trajektorien erfolgte so, dass sie eine möglichst effektive Steuerung der Partikelbewegung gewährleisten. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Trajektorien das Voxelraaster ausreichend abdecken, um eine gezielte Beeinflussung der Partikel zu ermöglichen. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass sich die einzelnen Trajektorien möglichst gering überschneiden, um konkurrierende Gradienten und damit unerwünschte Interferenzen bei der Netzbildung zu vermeiden. Die Ausprägung der Trajektorien wurde so gewählt, dass sie als eindeutige Leitlinien auf der Spurkarte für die Ausbildung der Pfadstrukturen dienen und eine klare Orientierung innerhalb des Modells ermöglichen.

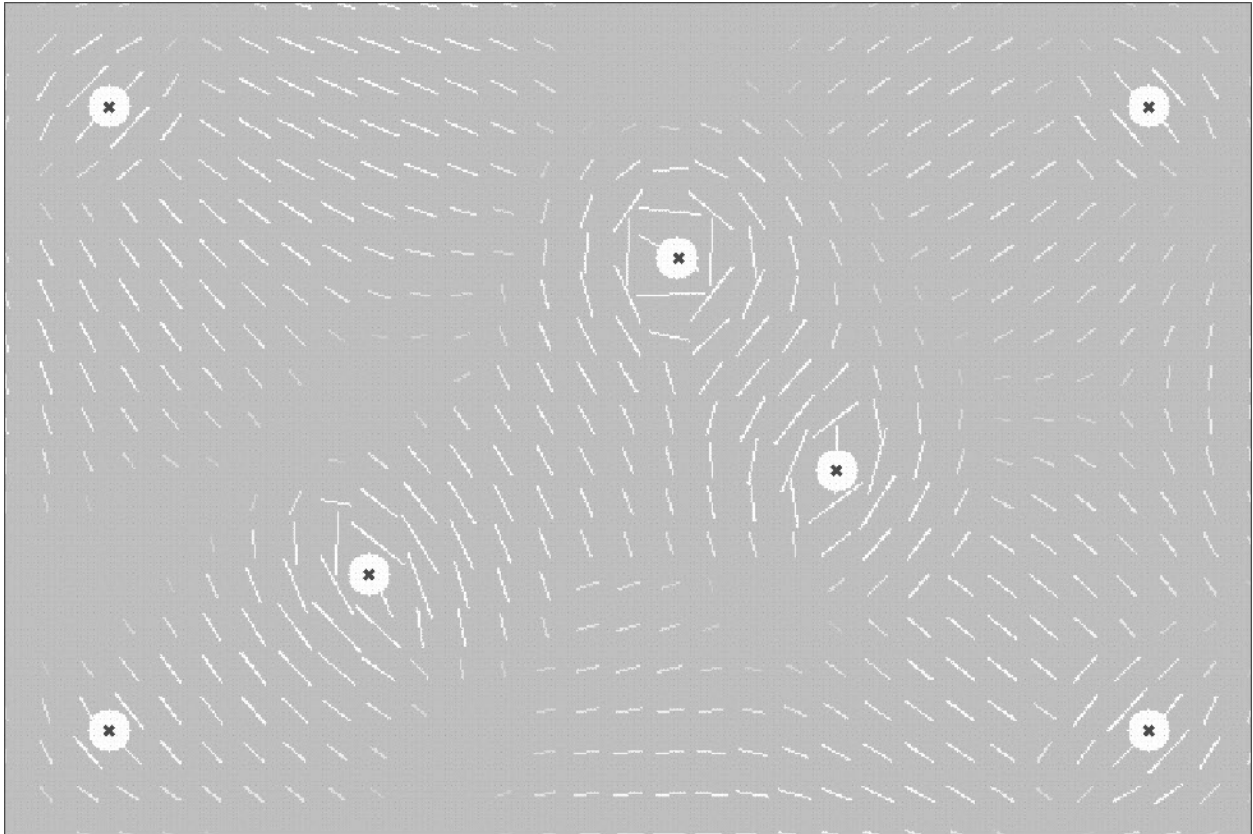


Abb. 6.1: Plattenmodell: Spurkarte auf Grundlage der Trajektorien

Die nachfolgende Tabelle zeigt die optimalen Parameterwerte, mit denen das deutlichste und stabilste Netzwerk erzielt werden konnte.

Plattenmodell - Parameter

Parameter	Bezeichnung	Wert
FE-Modell	Netzgröße	0,2
	Skalierungsfaktor	100
Umgebung	Dimensionen	600x400 Voxel
	$wProj$	0,1
	$diffK$	1
	$decayT$	0,01
	Begrenzung	Periodisch
Partikel	$\%p$	0,9
	SS	1
	SO	5
	SA	60°
	RA	45°
	$depT$	1

Auflager	Bereichsweite	10
	Multiplikator	30
Trajektorien	Schwellenwert m_1	0,45
	Schwellenwert m_2	0,45
	Faktor	3
	Grenzwert	0,2
	Bereichsweite	0
	Multiplikator	minimal 10
		maximal 30

Tab. 6.2: Plattenmodell - Parameter

6.2 Ergebnisse

Das Partikelmodell generiert nach mehreren Iterationsschritten ein Netzwerk, das sich deutlich an den vorgegebenen Trajektorien orientiert. Direkt nach der Erzeugung richten sich die Partikel zunächst an den nächstgelegenen Trajektorien aus, wodurch lokal differenzierte Partikelcluster entstehen. Mit fortschreitender Simulation entwickeln sich daraus zunehmend feingliedrige Pfadstrukturen, wobei der Einfluss der Trajektorien auf die entstehenden Muster bereits in frühen Phasen klar erkennbar ist. Im weiteren Verlauf ziehen sich die Partikel aus trajektorienfreien Bereichen zurück, wodurch dort größere Netzmaschen entstehen und die Anzahl der Pfade in diesen Regionen weiter abnimmt. Das Partikelmodell zeigt somit das gewünschte Musterbildungs- und Optimierungsverhalten: Die Netzwerkpfade übernehmen die Orientierung der Trajektorien und bilden optimale, minimale Verbindungen aus.

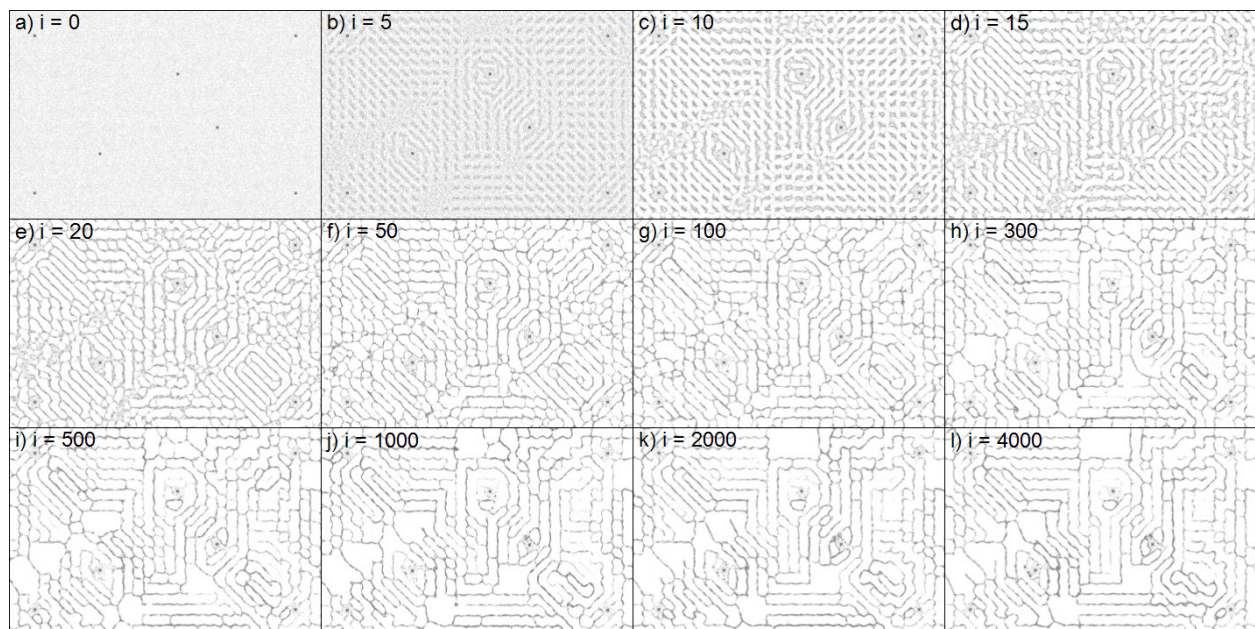


Abb. 6.2: Plattenmodell: a) Initiale Platzierung der Partikelpopulation; b) - k) Entwicklung der Musterbildung in ausgewählten Iterationen; l) Minimales Transportnetzwerk im Gleichgewichtszustand bei Iteration $i = 4000$

Wie beim biologischen Vorbild erfolgt die Netzwerkbildung im Modell ohne zentrale Steuerung. Die Strukturen entstehen allein durch lokale Wechselwirkungen und Rückkopplungsmechanismen, was die Robustheit und Anpassungsfähigkeit des Systems erhöht.

Mehrere Simulationen mit identischen Eingabewerten und Modellparametern führen nach einer gleichen Anzahl von Iterationsschritten zu weitgehend übereinstimmenden Netzwerkstrukturen. Die vorgegebenen Trajektorien bieten somit ausreichend Orientierung, um eine konsistente und stabile Grundlage für die Tragwerksanalyse zu gewährleisten.

Die beobachtete Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unterstreicht die Zuverlässigkeit des

Modells und ermöglicht eine fundierte Übertragung der emergenten Netzwerkstrukturen auf ingenieurtechnische Anwendungen. Darüber hinaus kann das Modell flexibel an unterschiedliche Randbedingungen angepasst werden, was den Einsatz in verschiedenen Optimierungs- und Analyseaufgaben unterstützt.



Abb. 6.3: Annähernd gleich Musterbildung bei verschiedenen Simulationsdurchläufen

Bei genauerer Analyse des Netzwerks lassen sich charakteristische Merkmale der trajektorieninduzierten Musterbildung identifizieren. Die Partikelpfade orientieren sich zunächst entlang der vorgegebenen Trajektorien und folgen diesen bis zu deren Endpunkten. Anschließend erfolgt die Ausbildung von Verbindungen zum Startpunkt der jeweils nächsten Trajektorie. Liegt der nächste Verbindungspunkt auf einem diagonal versetzten Rasterpunkt, entstehen hexagonale Netzstrukturen. Befindet sich die nächste Trajektorie hingegen auf einem benachbarten, parallel angeordneten Rasterpunkt, resultiert dies, abhängig vom Hauptachsenwinkel, in einem gezackten Pfadverlauf. Es zeigt sich somit eine deutliche Abhängigkeit der resultierenden Musterbildung von der FE-Netzstruktur.

Weiterhin ist zu beobachten, dass nicht alle Trajektorien mit gleicher Partikeldichte in das Netzwerk integriert werden. Dies ist zum Einen auf die Modell- und Populationsgröße zurückzuführen, wodurch die Anzahl der verfügbaren Partikel begrenzt ist. Obwohl das Ziel eine minimale und effiziente Netzstruktur ist, wird dennoch eine hohe Konnektivität entlang der Trajektorien angestrebt, sodass die Partikel relativ große Pfadstrecken abdecken müssen. Zum Anderen führt die stochastische Generierung der Partikel sowie die zufällige Rotation bei nicht erfolgreicher Vorwärtsbewegung zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Partikeldichte im Netzwerk.

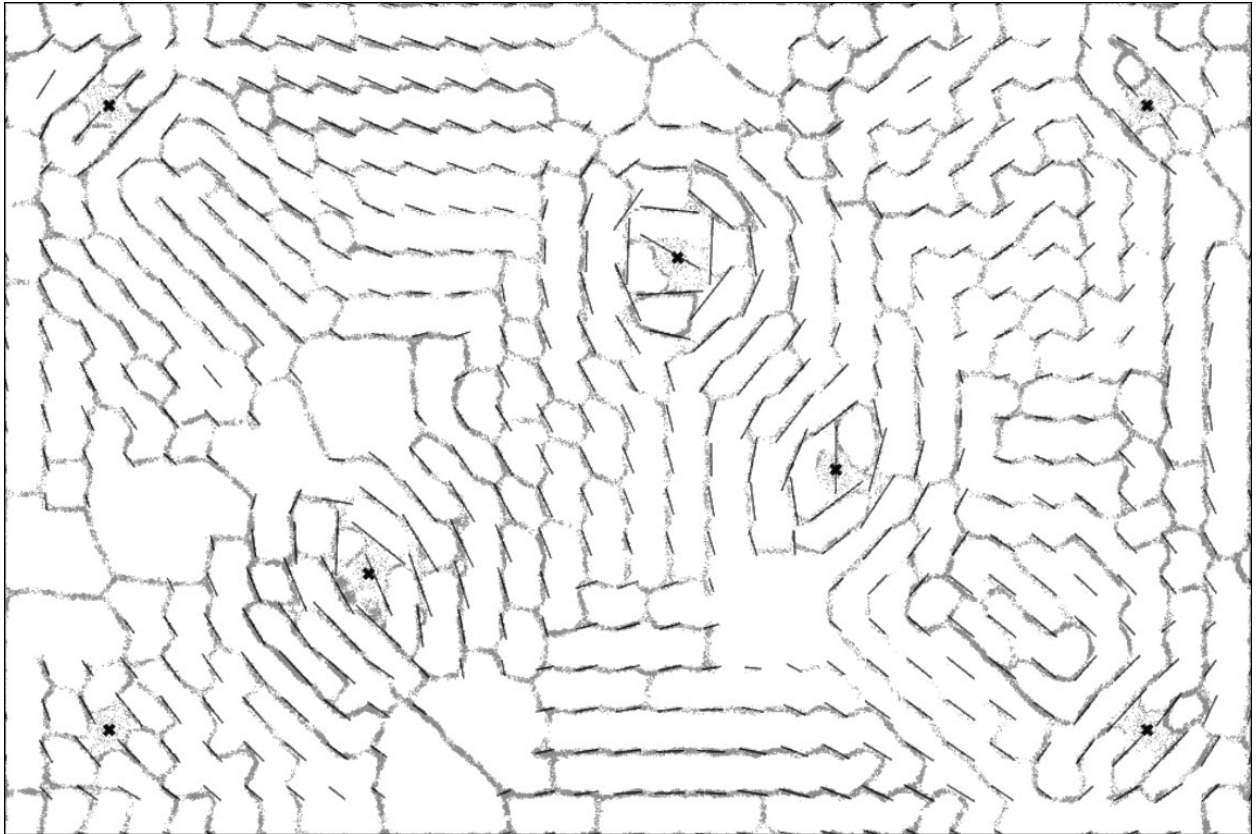


Abb. 6.4: Überlagerte Darstellung der Trajektorien und der generierten Netzstruktur

Die resultierende Netzstruktur bietet eine Grundlage, auf welcher sich eine auf die spezifische Plattenbeanspruchung basierte Bewehrungsverlegung entwerfen lässt. Aufgrund der Verknüpfung zur FE-Berechnung lässt es sich flexibel auf beliebige Auflagerkonfigurationen anpassen und ermöglicht eine effiziente Anwendung auch bei komplexen Randbedingungen. Die selbstorganisierende Netzwerkbildung kann genutzt werden, um den maßgeblichen Kraftfluss zu visualisieren und die Bewehrungsverlegung anzupassen. Durch die Orientierung der Bewehrung entlang der emergenten Netzwerkstrukturen wird die Tragfähigkeit optimiert. Im Gegensatz zur konventionellen Bewehrungsverlegung entfallen dabei die Tragfähigkeitsverluste aufgrund der Transformationsgleichungen zur Ausrichtung an ein orthogonales Raster, da das Netzwerk gezielt lastoptimierte Pfade ausbildet. Dies führt zu einer besseren Ausnutzung des eingesetzten Materials und trägt sowohl zur Erhöhung der Tragfähigkeit als auch zur Wirtschaftlichkeit des Tragwerks bei.

7 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das auf dem Verhalten von *Physarum polycephalum* basierende Partikelmodell ein vielversprechender Ansatz zur Visualisierung des räumlichen Spannungsflusses in Plattentragwerken darstellt. Durch die Simulation der Partikelinteraktionen gelang es, die Hauptspannungspfade in der Platte als adaptives Netzwerk abzubilden. Dies ermöglicht ein intuitives Verständnis der Kraftweiterleitung, das über die klassische Darstellung von Spannungstrajektorien in FEM-Software hinausgeht. Die generierten Netzstrukturen folgen dabei den natürlichen Kraftfluss und bilden, ähnlich dem Vorbild *Physarum polycephalum*, redundante Verbindungen aus, die mögliche Lastumlagerungen antizipieren.

Ein weiterer Vorteil des bioinspirierten Ansatzes liegt in seiner hohen Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Geometrien, Lastfälle und Auflagerbedingungen. Während klassische Bemessungsverfahren häufig an ihre Grenzen stoßen, wenn es um komplexe oder unregelmäßige Plattenformen geht, kann das partikelbasierte Modell flexibel auf lokale Gegebenheiten reagieren und so für jede Situation eine optimierte Netzstruktur generieren. Damit eröffnet sich ein neues Potenzial für die Planung und Bemessung von Tragwerken, das insbesondere im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit von großer Bedeutung ist.

Der besondere Wert des Modells liegt in seiner Fähigkeit, räumlich verteilte Spannungsverläufe zu visualisieren, die in orthogonalen Rastern nur unzureichend abgebildet werden. Praktisch relevant ist dies insbesondere bei unregelmäßigen Plattengeometrien oder komplexen Auflagerbedingungen, wo herkömmliche Darstellungsmethoden an ihre Grenzen stoßen. Die Ergebnisse legen nahe, dass solche biologisch inspirierten Simulationsansätze künftig als ergänzendes Werkzeug in der Entwurfsphase eingesetzt werden könnten, um Ingenieuren ein besseres Gefühl für den Kraftfluss zu vermitteln.

Die erfolgreiche Anwendung des Modells wirft zugleich die Frage auf, wie sich die resultierenden, nicht mehr strikt orthogonalen Bewehrungsstrukturen bautechnisch ausführen lassen. Für die praktische Umsetzung der visualisierten Netzwerkstrukturen bieten moderne, adaptive Herstellungsverfahren neue Möglichkeiten. Insbesondere digitale Fertigungstechnologien wie robotergestützte Bewehrungslegung, 3D-Druck von Bewehrungselementen oder automatisierte Biegeprozesse ermöglichen es, komplexe und individuell angepasste Bewehrungsgeometrien wirtschaftlich und präzise herzustellen. Durch die Integration von digitalen Planungs- und Fertigungsprozessen (Stichwort: Building Information Modeling, BIM) kann der gesamte Workflow - von der Simulation über die Planung bis zur Ausführung - nahtlos miteinander verknüpft werden. Dies eröffnet nicht nur neue Freiheitsgrade in der Gestaltung von Tragwerken, sondern trägt auch dazu bei, die im Modell

7 Schlussbetrachtung und Ausblick

identifizierten Materialeinsparpotenziale tatsächlich in die gebaute Realität zu überführen.

Allerdings zeigt die Arbeit auch, dass eine direkte Übertragung der Partikelpfade in Bewehrungsanordnungen nicht trivial ist: Aspekte wie Mindestbewehrungsgehalte, Verbundsicherheit und Rissbreitenbegrenzung erfordern zusätzliche Anpassungsschritte, die im Modell noch nicht abgebildet sind.

Zukünftige Forschungen sollten daher untersuchen, wie sich die simulierten Netzwerke unter Einhaltung baupraktischer Randbedingungen, wie Mindestbiegeradien und Stababstände algorithmisch optimieren lassen. Gleichzeitig wäre es lohnenswert, das Modell um eine quantitative Spannungsbewertung zu erweitern, um die Dichte der Partikelpfade direkt mit der Höhe der Hauptzugspannungen zu korrelieren. Dies könnte die Grundlage für eine automatische Bewehrungsdimensionierung entlang der visualisierten Trajektorien schaffen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Kombination aus bionischen Optimierungsmodellen und adaptiven Fertigungsmethoden einen vielversprechenden Weg für die nachhaltige Weiterentwicklung des konstruktiven Ingenieurbaus darstellt.

Symbolverzeichnis

α_b	Winkel zwischen der lokalen Achse x bzw. y und der Hauptachse 1 bzw. 2
β_b	Winkel zwischen Hauptquerkraft und lokaler Achse x
∂	Symbol für partielle Ableitung
E	Elastizitätsmodul
ε	Linearer Verzerrungstensor
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Komponenten des linearen Verzerrungstensor
G	Schubmodul
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Schubkomponenten des linearen Verzerrungstensors
g_k	charakteristische Flächenlast aus Eigengewicht
h	Plattendicke
h_s	reduzierte Schubdicke
K	Plattensteifigkeit
m_2, m_2	Hauptmomente im Plattenmodell
m_x, m_y	Biegemomente im Plattenmodell
m_{xy}	Drillmoment im Plattenmodell
ν	Querkontraktionszahl
p_d	Design-Flächenlast der Bemessungskombination
Φ, Ψ	Hilfsfunktionen
φ_x, φ_y	Verdrehungswinkel im Plattenmodell

Symbolverzeichnis

q_k	charakteristische Flächenlast aus Nutzlast
σ	Cauchy'scher Spannungstensor
σ_2, σ_2	Hauptspannungen im Plattenmodell
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannung
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Schubspannung
τ	Wichte
u, v, w	Verschiebungsvektoren
$v_{max,b}$	maximal resultierende Querkraft aus Biegeanteilen
v_x, v_y	Querkräfte im Plattenmodell
x, y, z	Globale kartesische Koordinaten

Abbildungsverzeichnis

3.1	Tragsystem einer Platte [4]	6
3.2	FE-Prinzip an einer Platte [5]	7
3.3	Anwendungsprozess der FEM bei der Berechnung eines statischen Modells [6] . .	8
3.4	Definition des Neigungswinkels φ_x an der Platte und Einfluss auf die Schubspannung	9
3.5	Flächenschnittgrößen und Flächenspannungen [10]	12
4.1	(a) Makroplasmodium, die vegetative Phase von <i>P. polycephalum</i> ; (b) Sklerotium, das Ruhestadium; (c) ein Schleimpilz trifft eine Entscheidung zwischen Nahrungsquellen unterschiedlicher Qualität; (d) das Adernetzwerk; (e) eine vergrößerte Ader; (f) mit DAPI eingefärbte Zellkerne im Plasmodium [20]	21
4.2	<i>Physarum polycephalum</i> durchwächst ein Labyrinth und findet dabei den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten (hier markiert mit AG, meist ein Nährstoff wie Haferflocken). Anfangs breitet sich das Plasmodium im gesamten Labyrinth aus (linkes Bild), zieht sich dann aber nach und nach aus den Sackgassen zurück und bildet schließlich einen effizienten Verbindungsweg zwischen den Nahrungsquellen (mittleres und rechtes Bild). Dieses Verhalten wird als ein Beispiel für biologisches Problemlösen betrachtet.[24]	24
4.3	Links: Darstellung des protoplasmatischen Röhrennetzwerks (vertikale Verbindungen zwischen Haferflocken) und der aktiven Plasmodium-Wachstumsfront des <i>Physarum polycephalum</i> . Rechts: Bildung eines protoplasmatischen Röhrennetzwerks innerhalb des Plasmodiums, das Nährstoffquellen (Haferflocken) verbindet. [25]	25
4.4	Verhaltensalgorithmus und Partikelmorphologie. Links: Der Pseudocode des motorisch-sensorischen Algorithmus eines einzelnen Partikels. Rechts: Die individuelle Partikelmorphologie basiert auf der zentrale Position mit vorwärtsgerichtete und versetzten Sensoren. [25]	28
4.5	Ebenenstruktur des Modells [25]	30
4.6	Spontane Musterbildung und -evolution. Gitter 200x200, %p 15, RA 45°, SA 22,5°, SO 9. Spurkarten-Muster, aufgenommen zu den Zeitpunkten 2, 22, 99, 175, 367, 512, 1740 und 4151 Iterationsschritte. [25]	32

4.7	Effekt des Sensorenabstands (SO) auf die Musterbildung und Granularität. Gitter 200x200, %p 15, SA 45°, RA 45°, 500 Iterationsschritte. Von links nach rechts: Musterbildung mit SO von 3, 9, 15, 25 Pixeln, Partikelpositionen dargestellt. [25]	33
4.8	Musterbildung und -evolution unter dem Einfluss vordefinierter Quellen von Chemoattraktanten. Oben links: Die Umgebung zeigt vordefinierte Quellen (dunkle Punkte), anfängliche Partikelpositionen (kleine graue Flecken) und die Grenze der Umgebung (einheitliches Grau). Verbleibende Bilder von links nach rechts: Evolution der Netzwerkbildung (Partikelspuren dargestellt). Die Minimierung des Netzwerks setzt sich fort, bis der kürzeste Weg zwischen den Quellen übrig bleibt. [25]	36
4.9	Netzwerkminimierung mittels der filamentösen Sammelmethode [27]	37
4.10	Plasmodiale Schrumpfungsmethode. Von links nach rechts: Evolution eines Durchlaufs der Schrumpfungsmethode - das Netzwerk reagiert und passt sich automatisch nach einer Reduktion der Partikelanzahl an. [25]	38
5.1	Eingabe des statisches System der Decke in RFEM	42
5.2	Biegemoment m_1 in Richtung der Hauptachse 1	43
5.3	Biegemoment m_2 in Richtung der Hauptachse 2	44
5.4	Winkel α_b zwischen der lokalen Achse x (bzw. y) und der Hauptachse 1 (bzw. 2)	45
5.5	Ergebniswerte an den Rasterpunkten 304, 305, 335 und 336	46
5.6	Übersicht: Modellierung des Partikelmodells für Plattentragwerke in Grasshopper	48
5.7	Import der RFEM-Modelldaten	49
5.8	Skalierung der RFEM-Modelldaten	50
5.9	Einlesen der Ergebniswerte aus der CSV-Datei	50
5.10	Glätten der Singularitäten aus der FE-Bemessung	51
5.11	Erzeugung der Trajektorien der Hauptmomente	51
5.12	Filtern des Trajektorienfeldes	52
5.13	Trajektorienfeld	52
5.14	Definition der Umgebung und der Umwelteffekte mittels der Parameter $wProj$, $diffK$, $decayT$	53
5.15	Definition der Partikel mittels der Parameter SS , SO , SA und RA unter Angabe der Populationsgröße $\%p$ und der Abgabemenge der Chemoattraktanten $depT$	54
5.16	Implementierung der Auflager als Chemoattraktanquellen	54
5.17	Implementierung der Trajektorien als Chemoattraktanquellen	55
5.18	Berechnungsmodul für die Durchführung der Partikelsimulation	55
5.19	Validierungsmodell: a) Spurkarte; b) Initiale Platzierung der Partikelpopulation; c)- o) Entwicklung der Musterbildung in ausgewählten Iterationen; p) Minimales Transportnetzwerk im Gleichgewichtszustand bei Iteration $i = 1000$	57

6.1	Plattenmodell: Spurkarte auf Grundlage der Trajektorien	61
6.2	Plattenmodell: a) Initiale Platzierung der Partikelpopulation; b) - k) Entwicklung der Musterbildung in ausgewählten Iterationen; l) Minimales Transportnetzwerk im Gleichgewichtszustand bei Iteration $i = 4000$	63
6.3	Annähernd gleich Musterbildung bei verschiedenen Simulationsdurchläufen . . .	64
6.4	Überlagerte Darstellung der Trajektorien und der generierten Netzstruktur . . .	65

Tabellenverzeichnis

4.2	Modell-Parameter	29
5.2	Ergebniswerte an den Rasterpunkten 304, 305, 335 und 336	45
5.4	Validierungsmodell - Parameter	56
6.2	Plattenmodell - Parameter	62

Literaturverzeichnis

- [1] Norm Januar 2011. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [2] *Kapitel C - Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente.* In: EIBL, J. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2001: Teil 2 - Stahlbeton und Spannbeton.* Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2001. – ISBN 3-433-01583-X
- [3] ROMBACH, G.: *Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau - Fehlerquellen und ihre Vermeidung.* Ernst & Sohn, 2000
- [4] P.BLOCK ; GENGNAGEL, C. ; PETERS, S.: *Faustformel - Tragwerksentwurf.* DVA, 2013
- [5] SCHLIER, K.: *Finite Elemente Modelle der Statik und Festigkeitslehre - 101 Anwendungsfälle zur Modellbildung.* Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2011. – ISBN 978-3-642-16620-4
- [6] KNOTHE, K. ; WESSELS, H.: *Finite Elemente - Eine Einführung für Ingenieure.* 5. Heidelberg : Springer Vieweg Berlin, 2017. – ISBN 978-3-662-49351-9
- [7] BRAESS, D.: *Finite Elemente - Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie.* 5. Berlin : Springer Berlin, 2013 (Masterclass). – ISBN 978-3-642-34796-2
- [8] BECKER, W. ; GROSS, D.: *Mechanik elastischer Körper und Strukturen.* Berlin, Heidelberg : Springer, 2002. – ISBN 978-3-540-43511-2
- [9] WERKLE, H.: *Finite Elemente in der Baustatik - Statik und Dynamik der Stab- und Flächentragwerke.* 3. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008. – ISBN 978-3-528-28882-2
- [10] DLUBAL SOFTWARE GMBH: *RFEM 6 Online-Handbuch.* <https://www.dlubal.com/de/downloads-und-infos/dokumente/online-handbuecher/rfem-6>. Version: 2024. – Zugriff am 11.09.2024
- [11] *Kapitel Platten.* In: BERG, D.: *DIN 1045 - Stahlbetonbau, Bemessung, Konstruktion.* Bd. 5. Auflage. München : Vogel, 1974

- [12] BAUMANN, T.: Tragrichtung orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächen-tragwerken aus Stahlbeton. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* (1972), Nr. Heft 217. ISBN 978-3-433-00607-8
- [13] KAPPEL, R.: *Zugseile in der Natur*, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2007
- [14] ROSSMANN, T. ; TROPEA, C.: *Bionik-Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [15] BRANDMAIER, A.: *Polymalataseabhängigkeit des Transports von Polymalat in Physarum polycephalum*, Universität Regensburg, Dissertation, 2005
- [16] ROLLS, Kit O.: *MAPPING SLIME MOLD - Using the image processing software Fiji to map the growth of Physarum Polycephalum*. <https://kitondaatjerolls.com/MAPPING-SLIME-MOLD>. Version: 2019. – Online; Mai 2024
- [17] NOWOTNY, W.: Myxomyceten (Schleimpilze) und Mycetozoa (Pilztiere) - Lebensform zwischen Pflanze und Tier. In: *Stapfia* (2000)
- [18] LAANE, M. M. ; HALVORSRUD, R.: Plasmaströmungen und Zelloszillationen im Schleimpilz *Physarum polycephalum*. In: *Mikrokosmos* (1993)
- [19] CLARK, J. ; HASKINS, EF.: Myxomycete plasmodial biology: a review. In: *Mycosphere* (2015)
- [20] BOUSSARD, A. ; FESSEL, A. ; OETTMEIER, C. ; BRIARD, L. ; DÖBEREINER, H-G. ; DUSSUTOUR, A.: Adaptive behaviour and learning in slime moulds: the role of oscillations. In: *Philosophical Transactions B* (2021)
- [21] GAUSE, C. R. B.: *Das System der Strategie: Ein Vergleich zwischen Strategien biologischer Systeme und militärischen Strategien - Eine Modellentwicklung*, Universität Potsdam, Dissertation, 2011
- [22] AL., M. A.: Chemotaxis. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/chemotaxis/13362>. Version: 1999. – Online; Juni 2024
- [23] KRAMAR, M. ; ALIM, K.: Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118 (2021), Nr. 10. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.2007815118>. – DOI <https://doi.org/10.1073/pnas.2007815118>
- [24] NAKAGAKI, Toshiyuki ; YAMADA, Hiroyasu ; TÓTH, Ágnes: Maze-solving by an amoeboid organism. In: *Nature* 407 (2000), September, Nr. 6803. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1038/35035159>. – DOI <https://doi.org/10.1038/35035159>

- [25] JONES, J.: Characteristics of pattern formation and evolution in approximations of Physarum transport networks. In: *Artificial life* (2010). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1162/artl.2010.16.2.16202>. – DOI <https://doi.org/10.1162/artl.2010.16.2.16202>
- [26] JONES, J.: Influences on the formation and evolution of Physarum polycephalum inspired emergent transport networks. In: *Natural Computing - An International Journal* (2010). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s11047-010-9223-z>. – DOI <https://doi.org/10.1007/s11047-010-9223-z>
- [27] JONES, J.: *The Emergence and Dynamical Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level Behaviours*. <https://arxiv.org/abs/1503.06579>. Version: 2015. – arXiv:1503.06579 [cs.ET]

Digitaler Anhang

Die Folgenden Dateien werden für die Informationserhaltung digital beigelegt:

- *BS1_statische_analyse_flächen_hauptschnittgrößen.csv*
- *FE – Deckenbemessung.rf6*
- *Protokoll_FE – Deckenbemessung.pdf*
- *GetMeshResults.py*
- *GH – Datei_Validierungsmodell.gh*
- *GH – Datei_Plattenmodell.gh*