

# KI-Profileditor

## KI-gestützte Generierung von Temperaturprofilen für pixelbasierte Matrixheizsysteme beim Thermoformen

### 1. Ausgangspunkt

Die watttron GmbH entwickelt und vertreibt pixelbasierte Heizsysteme für industrielle Wärmeprozesse, insbesondere für das Thermoformen von Kunststofffolien. Ein solcher Matrixheizer besteht aus einer Vielzahl separat ansteuerbarer Heizelemente, die in einer Matrix angeordnet sind. Jedes Heizelement, auch Heizpixel genannt, kann individuell mit einem Temperatur-Sollwert oder einem zeitabhängigen Temperaturverlauf betrieben werden. Aus der Gesamtheit dieser Sollwerte entsteht ein Temperaturprofil, das als digitales Wärmebild des Heizsystems verstanden werden kann.

Beim Thermoformen wird eine thermoplastische Folie zunächst erwärmt und anschließend in oder über ein Werkzeug umgeformt. Das lokale Temperaturfeld der Folie hat einen erheblichen Einfluss darauf, wie stark sich die Folie in bestimmten Bereichen dehnt, wie sich die Wanddicke verteilt und welche mechanischen Eigenschaften die fertige Verpackung aufweist. Je nach Verpackungsgeometrie, Folienmaterial, Foliendicke, Werkzeug, Prozessführung und gewünschtem Optimierungsziel kann ein anderes Temperaturprofil erforderlich sein.

Die Erstellung eines geeigneten Temperaturprofils ist derzeit ein technisch anspruchsvoller Optimierungsprozess. Ein erfahrener Anwender muss aus der Verpackungsgeometrie, dem Materialverhalten, dem Prozesswissen und den Messergebnissen aus Versuchen ableiten, welche Bereiche der Folie stärker oder schwächer beheizt werden sollen. Dies erfolgt häufig iterativ: Ein erstes Profil wird erstellt, eine Verpackung wird geformt, das Ergebnis wird bewertet, das Profil wird verändert, und dieser Ablauf wird so lange wiederholt, bis ein akzeptables oder optimales Thermoformergebnis erreicht wird.

Diese Vorgehensweise ist zeitaufwändig, expertenabhängig und nur begrenzt skalierbar. Sie führt außerdem dazu, dass wertvolles Erfahrungswissen aus vergangenen Packungsoptimierungen nicht systematisch für neue Verpackungen, neue Materialien oder neue Optimierungsziele nutzbar gemacht wird.

### 2. Zu lösendes technisches Problem

Das technische Problem besteht darin, für eine neue oder geänderte Verpackung und eine bestimmte Folie möglichst schnell ein geeignetes Temperaturprofil für einen Matrixheizer zu erzeugen, ohne dass hierfür jedes Mal ein vollständig manueller, erfahrungsbasierter und versuchsintensiver Optimierungsprozess erforderlich ist.

Dieses Problem umfasst mehrere Teilprobleme.

Erstens existiert keine einfache lineare Beziehung zwischen Verpackungsgeometrie und Temperaturprofil. Unterschiedliche Bereiche einer Verpackung, etwa Boden, Ecken, Seitenwände, Radien, Stege, Rippen, Siegelränder oder tiefe Kavitäten, können sehr unterschiedliche lokale Umformgrade aufweisen. Ein Bereich, der später stark gedehnt wird, benötigt unter Umständen eine andere Temperaturführung als ein Bereich, der kaum umgeformt wird.

Zweitens hängt das optimale Profil stark vom Folienmaterial und von der Foliendicke ab. Unterschiedliche Kunststoffe, Mehrschichtfolien, Rezyklatanteile, Barrierefolien oder geschäumte Folien können trotz ähnlicher Geometrie ein unterschiedliches thermisches und mechanisches Verhalten zeigen. Das Verarbeitungsfenster, also der Temperaturbereich zwischen ausreichender Formbarkeit und beginnender Materialschädigung, muss berücksichtigt werden.

Drittens kann das Optimierungsziel variieren. Ein Temperaturprofil kann auf eine möglichst gleichmäßige Materialverteilung ausgelegt sein. In anderen Fällen steht ein maximaler Topload, eine bestimmte Haptik, eine definierte Wanddicke an kritischen Stellen, eine reduzierte Materialmenge, ein optisches Qualitätsziel, ein breiteres Prozessfenster, eine geringere Ausschussrate oder eine verkürzte Einrichtzeit im Vordergrund. Das technisch beste Profil ist daher nicht immer dasselbe Profil.

Viertens liegen historische Optimierungsdaten meist in heterogener Form vor. Zu einer früher optimierten Verpackung können CAD-Daten, Skizzen, Materialangaben, Messwerte, Temperaturprofile, Versuchsnotizen, Prozessparameter, Wanddickenmessungen, Topload-Prüfungen, subjektive Bewertungen und Ergebnisfotos existieren. Diese Daten werden bislang nicht zwangsläufig in einer Form gespeichert, die eine automatische Wiederverwendung für neue Aufgaben erlaubt.

Fünftens ist der Suchraum sehr groß. Ein Matrixheizer mit vielen einzeln ansteuerbaren Pixeln kann eine sehr große Zahl möglicher Temperaturprofile erzeugen. Eine simulationsgestützte Suche in diesem Raum ist ineffizient. Auch klassische regelbasierte Ansätze stoßen an Grenzen, weil lokale Materialdehnung, Wärmeleitung, Strahlung, Maschinenparameter und Geometrieeffekte miteinander wechselwirken.

Die hier beschriebene Idee löst dieses Problem durch ein KI-gestütztes System, das aus vergangenen Packungsoptimierungen, Messdaten und optionalen Simulationsdaten lernt und daraus Vorschläge für Temperaturprofile neuer Verpackungen oder neuer Folien ableitet.

### 3. Grundidee der KI-gestützten Profilerzeugung

Die Grundidee besteht darin, ein trainiertes KI-Modell zu verwenden, das Eingabedaten einer Thermoformaufgabe verarbeitet und daraus ein oder mehrere Temperaturprofile für einen Matrixheizer generiert.

Die Eingabedaten können insbesondere umfassen:

Folienmaterial oder Folientyp, Foliendicke, Aufbau der Folie, Materialklasse, Rezyklatanteil, Farbe, Transparenz, Schmelz- oder Erweichungsverhalten, materialspezifisches Verarbeitungsfenster, Ziel der Optimierung, gewünschte Materialverteilung, gewünschte Wanddickenverteilung, gewünschter Topload, gewünschte Haptik, Verpackungsgeometrie, Kavitätentiefe, Kontur, Radien, Ecken, Siegelrand, Bodenfläche, Seitenwandflächen, lokale Ziehverhältnisse, Werkzeugdaten, Maschinenparameter, Heizabstand, Heizzeit, Zykluszeit, Umformdruck, Werkzeugtemperatur, Stempel- oder Plug-Assist-Daten, Materiallaufrichtung, Positionierung der Verpackung relativ zum Matrixheizer und sonstige Prozessdaten.

Das KI-Modell gibt als Ergebnis mindestens ein Temperaturprofil aus. Dieses Temperaturprofil kann als zweidimensionale Matrix von Temperatur-Sollwerten vorliegen, deren Auflösung der Heizpixelmatrix entspricht oder auf diese abgebildet wird. Das Profil kann außerdem als Korrekturprofil zu einem bestehenden Profil, als regionenbasiertes Profil, als zeitabhängiges

Profil, als mehrstufiges Heizprogramm oder als Satz mehrerer alternativer Profile ausgegeben werden.

Die KI kann dabei nicht nur ein einzelnes Profil erzeugen, sondern auch eine erwartete Wirkung des Profils vorhersagen. Beispielsweise kann das System zusätzlich eine prognostizierte Wanddickenverteilung, eine prognostizierte Topload-Verbesserung, einen Energiebedarf, eine Ausschusswahrscheinlichkeit, eine Unsicherheitsbewertung oder eine Empfehlung für den nächsten Versuch ausgeben.

Die Generierung kann vollständig automatisch oder als Assistenzfunktion erfolgen. In einer bevorzugten Ausgestaltung schlägt das System ein Temperaturprofil vor, das ein menschlicher Anwender im Advanced Profile Editor prüfen, verändern, akzeptieren, sperren oder für einzelne Regionen anpassen kann. Nach einem realen Versuch werden die erreichten Ergebnisse zurückgeführt, sodass das Modell oder ein zugehöriges Optimierungssystem aus neuen Daten weiterlernen kann.

## 4. Trainingsdaten und Datenmodell

Das KI-Modell wird mit historischen Packungsoptimierungen trainiert. Eine Packungsoptimierung bezeichnet hierbei einen Vorgang, bei dem für eine bestimmte Verpackungsgeometrie, eine bestimmte Folie und ein bestimmtes Optimierungsziel ein Temperaturprofil manuell oder simulativ mittels FEM erstellt, getestet und bewertet wurde.

Ein Trainingsdatensatz kann für jede Optimierung insbesondere folgende Daten enthalten:

Materialdaten der Folie, beispielsweise Materialtyp, Herstellerangabe, Foliendicke, Schichtaufbau, Dichte, Glasübergangs- oder Erweichungsbereich, Schmelzbereich, Kristallinität, Farbe, Absorptionsverhalten, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und zulässiges Verarbeitungsfenster.

Geometriedaten der Verpackung, beispielsweise CAD-Modell, Werkzeugzeichnung, Kavitätenkontur, Tiefenkarte, Höhenkarte, Wandflächen, Eckenradien, Siegelrand, Bodenbereich, Stege, Rippen, Hinterschnitte, Entformungsschrägen, lokale Flächenvergrößerung, lokales Ziehverhältnis und Lage der Verpackung relativ zum Heizfeld.

Prozessdaten, beispielsweise Heizzeit, Heizabstand, Maschinentyp, Werkzeugtemperatur, Formdruck, Vakuum, Druckluft, Plug-Assist-Geometrie, Plug-Assist-Bewegung, Materialaufrichtung, Taktzeit, Umgebungstemperatur und sonstige Maschinenparameter.

Optimierungsziel, beispielsweise gleichmäßige Materialverteilung, maximaler Topload, definierte Haptik, Materialreduktion, Wanddickenerhöhung an kritischen Stellen, Reduzierung von Falten, Reduzierung von Weißbruch, Verbesserung der optischen Qualität, Vergrößerung des Prozessfensters, Reduzierung des Energieeinsatzes oder Kombination mehrerer Ziele mit Gewichtungsfaktoren.

Temperaturprofildaten, insbesondere das finale von Menschen erzeugte Temperaturprofil, Heizer-, Pixel- und Modulgröße, Zwischenprofile aus mehreren Iterationsschritten, Profiländerungen zwischen den Iterationen, Temperaturgrenzen, regionenbezogene Temperaturvorgaben, Pixel-Sollwerte, zeitabhängige Temperaturverläufe, Glättungsparameter und gesperrte Profilbereiche.

Optimierungsziel für das zu verpackende Produkt, beispielsweise gemessene Wanddickenverteilung, Materialverteilung, Topload-Messwert, Verformungsbild,

Haptikbewertung, optische Bewertung, Ausschussrate, Messbilder, Thermobilder, Defektklassen, Bewertung durch Experten, Anzahl der benötigten Iterationen und finaler Freigabestatus.

Auch nicht erfolgreiche Versuche können als Trainingsdaten verwendet werden. Negative Beispiele, bei denen etwa Materialschädigung, zu geringe Umformung, Faltenbildung, unzureichende Wanddicke, schlechte Haptik oder optische Defekte auftraten, sind besonders wertvoll, weil das Modell daraus lernen kann, welche Temperaturbereiche, Gradienten oder lokalen Profiländerungen zu vermeiden sind.

Die Daten werden vorzugsweise in einem strukturierten Datenschema gespeichert. Ein solches Schema kann eine eindeutige Projekt-ID, eine Verpackungs-ID, eine Material-ID, eine Profilversion, eine Versuchsversion, eine Maschinenkonfiguration, eine Zeitmarke, einen Bedienerhinweis und eine Qualitätsbewertung enthalten. Freitextnotizen können ergänzend gespeichert und mit Verfahren der Sprachverarbeitung in strukturierte Merkmale oder Labels überführt werden.

## 5. Aufbereitung der Geometriedaten

Ein wesentlicher Bestandteil der Idee ist die Umwandlung einer Verpackungsgeometrie in eine maschinen- und modellverarbeitbare Repräsentation.

Aus einem CAD-Modell, einer Werkzeugzeichnung, einer STL-Datei, einer Tiefenkarte, einer Skizze oder einem sonstigen Geometriemodell wird eine digitale Beschreibung erzeugt, die mit dem Koordinatensystem des Matrixheizers verknüpft ist. Dabei können die Lage der Verpackung auf der Folie, die Materialaufrichtung, die Orientierung der Kavitäten und die Referenzecke der Maschine berücksichtigt werden.

Die Geometrie kann in mehrere numerische Kanäle überführt werden. Beispiele sind eine Tiefenkarte, eine Konturmaske, eine Maske für den Siegelrand, eine Maske für Bodenbereiche, eine Maske für Seitenwandbereiche, eine Karte lokaler Ziehverhältnisse, eine Karte lokaler Krümmung, eine Karte der Nähe zu Ecken oder Radien, eine Karte der Werkzeugkontaktbereiche und eine Karte erwarteter Materialdehnung.

Diese Kanäle können auf die Pixelmatrix des Heizsystems gerastert werden. Dadurch erhält das KI-Modell für jedes Heizpixel oder für jede Gruppe von Heizpixeln Informationen darüber, welche geometrische Funktion der entsprechende Folienbereich später in der Verpackung erfüllen wird.

In einer weiteren Ausgestaltung wird die Geometrie nicht nur als Rasterbild, sondern als Graph verarbeitet. Dabei können Knoten des Graphen geometrische Bereiche, Flächen, Kanten, Radien oder Funktionszonen der Verpackung repräsentieren. Kanten des Graphen beschreiben räumliche Nachbarschaften, Materialflussbeziehungen oder erwartete Dehnungskopplungen. Ein Graphmodell kann daraus lernen, wie Temperaturänderungen in einem Bereich auf benachbarte Bereiche wirken.

## 6. Berücksichtigung des materialspezifischen Verarbeitungsfensters

Das System berücksichtigt vorzugsweise das Verarbeitungsfenster des jeweiligen Folienmaterials. Dieses Verarbeitungsfenster beschreibt den Temperaturbereich, in dem die Folie ausreichend formbar ist, ohne dass unerwünschte Effekte wie Schrumpfen, Überdehnung, Verfärbung, Oberflächenschädigung, Schmelzen oder sonstige Materialschädigungen auftreten.

Das Verarbeitungsfenster kann experimentell mittel DMA oder DSC bestimmt, aus historischen Daten abgeleitet, aus Materialdatenbanken geladen oder durch Simulation ergänzt werden. Es kann als globaler Temperaturbereich, als material- und prozessabhängige Funktion, als Wahrscheinlichkeitsverteilung oder als mehrdimensionales Fenster beschrieben werden, das von Foliendicke, Heizzeit, Heizabstand und Maschinenparametern abhängt.

Das KI-Modell kann so trainiert oder beschränkt werden, dass erzeugte Temperaturprofile innerhalb zulässiger Grenzen liegen. Alternativ kann ein nachgelagerter Optimierer das vom Modell vorgeschlagene Profil prüfen und korrigieren. Dabei können harte Nebenbedingungen, etwa minimale und maximale Pixeltemperaturen, und weiche Nebenbedingungen, etwa zulässige Temperaturgradienten, verwendet werden.

Eine bevorzugte Ausgestaltung besteht darin, dass das System für jedes Pixel nicht nur einen Sollwert, sondern auch einen zulässigen Bereich oder eine Konfidenz ausgibt. Der Anwender erkennt dadurch, welche Bereiche des Profils aus Sicht des Modells kritisch oder unsicher sind.

## 7. Modellarchitektur und Trainingsverfahren

Das KI-System kann verschiedene Modelltypen verwenden. Die Offenbarung ist nicht auf eine bestimmte KI-Architektur beschränkt.

In einer ersten Ausführungsform wird ein überwachttes Lernmodell trainiert, das aus Eingabedaten direkt ein Temperaturprofil vorhersagt. Die Trainingsbeispiele bestehen aus vergangenen Aufgaben und den dazugehörigen finalen oder besonders erfolgreichen Temperaturprofilen. Das Modell lernt eine Abbildung von Material, Foliendicke, Geometrie, Optimierungsziel und Prozessparametern auf eine Matrix von Temperatur-Sollwerten.

In einer zweiten Ausführungsform wird ein Encoder-Decoder-Modell verwendet. Der Encoder verarbeitet die Verpackungsgeometrie, beispielsweise als Tiefenkarte, CAD-Raster oder Graph. Weitere Encoder verarbeiten Materialdaten, Prozessdaten und Zielgrößen. Der Decoder erzeugt daraus ein Temperaturprofil in der Auflösung des Matrixheizers. Geeignete Modellfamilien sind beispielsweise Convolutional Neural Networks, U-Net-Architekturen, Vision Transformer, Graph Neural Networks, Autoencoder, Diffusionsmodelle, Conditional Generative Models oder Neural Operators.

In einer dritten Ausführungsform wird ein generatives Modell verwendet. Dieses erzeugt mehrere plausible Temperaturprofile für dieselbe Aufgabe. Die Profile können sich beispielsweise in Energieeinsatz, Sicherheitsabstand zum Materiallimit, erwarteter Wanddickenverteilung oder Robustheit unterscheiden. Der Anwender oder ein nachgelagerter Optimierer wählt daraus ein Profil aus.

In einer vierten Ausführungsform wird ein Vorwärtsmodell mit einem inversen Optimierer kombiniert. Das Vorwärtsmodell sagt vorher, welches Thermoformergebnis bei gegebenem Temperaturprofil zu erwarten ist. Ein Optimierungsalgorithmus sucht anschließend das Temperaturprofil, das die gewünschte Zielgröße maximiert oder eine Verlustfunktion minimiert. Als Optimierer kommen beispielsweise Gradientenverfahren, evolutionäre Algorithmen, Bayesian Optimization, Reinforcement Learning, Sampling-Verfahren oder hybride Verfahren in Betracht.

In einer fünften Ausführungsform wird ein fallbasiertes System eingesetzt. Das System sucht in einer Datenbank nach früheren Verpackungen, die einer neuen Verpackung hinsichtlich Geometrie, Material, Foliendicke und Optimierungsziel ähneln. Aus den besten historischen

Fällen wird ein Startprofil abgeleitet, das anschließend durch ein KI-Modell angepasst wird. Dadurch kann vorhandenes Expertenwissen besonders transparent genutzt werden.

In einer sechsten Ausführungsform wird ein physikalisch informierter Ansatz verwendet. Dabei werden Materialgesetze, Heizleistungsgrenzen, Temperaturgradienten, Wärmeleitung, Strahlungsabsorption, Prozesszeiten und Umformmodelle als Nebenbedingungen oder Zusatzinformationen in das KI-System integriert. Das Modell lernt dann nicht nur aus Daten, sondern wird durch physikalische Plausibilität beschränkt. Diese Ausführungsform wird sinnvollerweise durch eine FEM-Simulation unterstützt.

## 8. Zielfunktionen und Qualitätsbewertung

Das System kann unterschiedliche Optimierungsziele verarbeiten. Ein Ziel kann durch eine einzelne Kennzahl oder durch eine gewichtete Kombination mehrerer Kennzahlen beschrieben werden.

Bei der Optimierung auf gleichmäßige Materialverteilung oder der Barrierewirkung wird beispielsweise eine möglichst geringe Abweichung der Wanddicke vom Zielwert angestrebt. In kritischen Bereichen kann eine Mindestwanddicke stärker gewichtet werden als in unkritischen Bereichen.

Bei der Optimierung auf Topload wird das Profil so gewählt, dass die fertige Verpackung eine möglichst hohe Stapel- oder Druckbelastbarkeit erreicht. Das Modell kann hierfür historische Topload-Messwerte verwenden und lernen, welche Temperaturverteilungen für bestimmte Geometrien und Materialien zu erhöhter Steifigkeit führen.

Bei der Optimierung auf Haptik kann das System subjektive Bewertungen, mechanische Kennwerte oder indirekte Messgrößen verwenden. Eine Verpackung kann beispielsweise als hochwertiger empfunden werden, wenn bestimmte Wandbereiche steifer sind, während andere Bereiche flexibel bleiben.

Bei der Optimierung auf Materialeinsparung wird ein Profil gesucht, das eine ausreichende technische Qualität bei geringerer Ausgangsfoliendicke oder bei reduzierter Materialmenge ermöglicht. Das System kann dabei Mindestanforderungen an Wanddicke, Topload, Haptik oder optische Qualität als Nebenbedingungen berücksichtigen.

Die Verlustfunktion des Trainings oder der Optimierung kann insbesondere folgende Terme enthalten: Abweichung zwischen KI-Profil und Expertenprofil, Abweichung zwischen vorhergesagter und gewünschter Wanddickenverteilung, Strafe für Unterschreitung einer Mindestwanddicke, Strafe für Überschreitung des Verarbeitungsfensters, Strafe für zu hohe lokale Temperaturgradienten, Strafe für übermäßigen Energieeinsatz, Strafe für erwartete Defekte, Unsicherheitsstrafe für unbekannte Material- oder Geometriebereiche und Belohnung für Robustheit gegenüber Prozessschwankungen.

## 9. Nutzung von Simulationsdaten

Zusätzlich oder alternativ zu realen Optimierungsdaten können Simulationsdaten verwendet werden. Eine Simulation kann das Thermoformen einer Folie für eine bestimmte Geometrie, ein bestimmtes Material, eine bestimmte Foliendicke und ein bestimmtes Temperaturprofil berechnen oder approximieren.

Simulationsdaten können insbesondere genutzt werden, um den Trainingsdatensatz zu erweitern, seltene Geometrien abzudecken, neue Materialien vorab zu untersuchen, Grenzbereiche des Verarbeitungsfensters zu bewerten oder negative Beispiele ohne reale Ausschussproduktion zu erzeugen.

In einer bevorzugten Ausgestaltung wird zunächst ein Simulationsmodell mit realen Messdaten kalibriert. Anschließend werden virtuelle Versuchsreihen erzeugt, bei denen Temperaturprofile systematisch variiert werden. Aus diesen virtuellen Versuchen lernt ein KI-Modell, welche Profiländerungen welche Wirkung auf Materialverteilung, Wanddicke, Topload oder Defekte haben. Danach wird das Modell mit realen Packungsoptimierungen feinabgestimmt.

Eine weitere Ausführungsform verwendet ein Surrogatmodell. Dieses Surrogatmodell approximiert eine aufwendige Thermoformsimulation und kann deshalb sehr viele Profilvarianten schnell bewerten. Ein Optimierer kann dann tausende oder Millionen potenzielle Temperaturprofile virtuell testen, bevor ein reales Profil am Matrixheizer verwendet wird.

## 10. Ablauf bei einer neuen Verpackung

Für eine neue Verpackung kann der Ablauf wie folgt aussehen.

Zunächst legt der Anwender im Advanced Profile Editor oder in einem verbundenen System ein neues Projekt an. Dabei werden Verpackungsgeometrie, Folienmaterial, Foliendicke, Maschinenkonfiguration und gewünschtes Optimierungsziel erfasst. Die Geometrie kann beispielsweise aus einer CAD-Datei importiert, aus einer Werkzeugzeichnung abgeleitet oder manuell in Funktionszonen eingeteilt werden.

Anschließend werden die Geometriedaten in das Koordinatensystem des Matrixheizers überführt. Das System erkennt oder übernimmt die Materialaufrichtung, die Lage der Kavitäten, die Referenzecke und die Skalierung. Danach werden geometrische Merkmale berechnet, etwa Tiefenkarte, lokale Ziehverhältnisse, Eckenbereiche, Radien, Bodenbereiche, Seitenwandbereiche und kritische Zonen.

Das KI-Modell erzeugt auf Basis dieser Eingaben ein initiales Temperaturprofil. Dieses Profil kann direkt auf die Heizpixelmatrix abgebildet oder zunächst als Vorschlag in einer grafischen Benutzeroberfläche angezeigt werden. Der Anwender kann das Profil prüfen, einzelne Bereiche manuell verändern, Temperaturgrenzen festlegen, Zonen sperren oder alternative Zielgewichtungen wählen.

Das System kann zusätzlich ähnliche historische Projekte anzeigen. Dazu werden frühere Verpackungen mit ähnlicher Geometrie, ähnlichem Material oder ähnlichem Optimierungsziel identifiziert. Der Anwender erhält dadurch eine Begründung, warum bestimmte Temperaturbereiche erhöht oder abgesenkt wurden.

Nach Freigabe wird das Profil auf dem Matrixheizer getestet. Das Thermoformergebnis wird gemessen oder bewertet. Messdaten können beispielsweise aus Wanddickenmessungen, Topload-Prüfungen, Kamerabildern, thermischen Messungen, Bedienerbewertungen oder Qualitätsprüfungen, wie OTR oder WVTR, stammen.

Die Ergebnisdaten werden dem Projekt zugeordnet und mit dem verwendeten Profil gespeichert. Das System kann daraufhin automatisch ein korrigiertes Profil vorschlagen. Beispielsweise kann

es Bereiche mit zu geringer Wanddicke erkennen und dort die Temperaturführung anpassen. Dieser Vorgang kann wiederholt werden, bis das gewünschte Thermoformergebnis erreicht ist.

Die abgeschlossene Optimierung wird anschließend als neuer Trainingsfall gespeichert. Dadurch verbessert sich die Datenbasis für zukünftige Verpackungen.

## 11. Human-in-the-loop und Erklärbarkeit

Ein wesentliches Merkmal der Idee ist, dass die KI den Anwender nicht ersetzen muss, sondern als Assistenzsystem eingesetzt werden kann. Der Anwender bleibt in der Lage, das erzeugte Profil zu prüfen und zu verändern.

Das System kann Erklärungen ausgeben, beispielsweise: „Dieser Bereich wird kühler vorgeschlagen, weil dort ein hohes lokales Ziehverhältnis erwartet wird“, „Die Temperatur im Siegelrand wird begrenzt, weil das Materialfenster überschritten werden könnte“, oder „Dieses Profil basiert auf drei ähnlichen historischen Optimierungen mit vergleichbarem Material und ähnlicher Kavitätentiefe.“

Ferner kann das System Unsicherheiten kennzeichnen. Für neue Materialien, ungewöhnliche Geometrien oder Bereiche außerhalb der bisherigen Trainingsdaten kann das Modell eine niedrigere Konfidenz ausgeben. In solchen Fällen kann der Anwender enger eingebunden oder ein konservativeres Startprofil gewählt werden.

## 12. Kontinuierliches Lernen und aktive Optimierung

Das System kann als lernender Regelkreis ausgestaltet sein. Jede neue Optimierung erzeugt zusätzliche Daten, die für spätere Optimierungen genutzt werden können.

In einer Ausführungsform werden neue Daten zunächst nur gespeichert und durch Experten freigegeben. Erst nach Freigabe werden sie in den Trainingsdatensatz übernommen. In einer anderen Ausführungsform erfolgt ein periodisches Nachtraining des Modells. In einer weiteren Ausführungsform werden Modellparameter lokal beim Kunden angepasst, während ein Basismodell zentral bereitgestellt wird.

Ein aktives Lernverfahren kann gezielt solche Versuche vorschlagen, die den größten Informationsgewinn erwarten lassen. Das System wählt also nicht nur ein wahrscheinlich gutes Profil, sondern kann auch ein Profil vorschlagen, das Unsicherheit reduziert und die weitere Optimierung beschleunigt. Dabei können Sicherheitsgrenzen des Materials und der Maschine eingehalten werden.

## 13. Integration in den Advanced Profile Editor

Die KI-gestützte Profilerzeugung kann in den Advanced Profile Editor integriert werden. Der Editor kann als zentrale Benutzeroberfläche dienen, in der Geometriedaten importiert, Materialdaten ausgewählt, Optimierungsziele eingestellt, KI-Vorschläge angezeigt, Profile manuell bearbeitet, Versuche dokumentiert und Ergebnisse zurückgespielt werden.

Eine mögliche Benutzerführung umfasst folgende Schritte: Projekt anlegen, Folie auswählen, Verpackungsgeometrie importieren, Maschine und Matrixheizer auswählen, Optimierungsziel definieren, KI-Profil erzeugen, Profil prüfen und bearbeiten, Profil exportieren oder an die Maschine übertragen, Versuch durchführen, Ergebnisdaten erfassen, Profil automatisch verbessern und final freigeben.

Der Advanced Profile Editor kann dabei mehrere Profilansichten bereitstellen. Eine Ansicht zeigt die Heizpixelmatrix. Eine weitere Ansicht zeigt die Verpackungsgeometrie oder Werkzeugkontur. Eine weitere Ansicht zeigt die prognostizierte Waddickenverteilung. Eine weitere Ansicht zeigt Abweichungen zwischen gewünschtem und erwartetem Ergebnis. Der Anwender kann zwischen diesen Ansichten wechseln oder sie übereinanderlegen.

## 14. Technische Varianten

Die Offenbarung umfasst insbesondere folgende Varianten, einzeln oder in Kombination:

Das KI-System erzeugt ein vollständiges Temperaturprofil für alle Heizpixel.

Das KI-System erzeugt nur ein Korrekturprofil, das auf ein bestehendes Profil addiert oder von diesem subtrahiert wird.

Das KI-System erzeugt ein regionenbasiertes Profil, das anschließend auf einzelne Heizpixel umgerechnet wird.

Das KI-System erzeugt ein zeitabhängiges Profil mit mehreren Heizphasen.

Das KI-System erzeugt mehrere alternative Profile mit unterschiedlichen Zielgewichtungen.

Das KI-System gibt zusätzlich eine Konfidenzkarte aus, die unsichere Bereiche kennzeichnet.

Das KI-System berücksichtigt das materialspezifische Verarbeitungsfenster als harte Nebenbedingung.

Das KI-System berücksichtigt das Verarbeitungsfenster als weiche Nebenbedingung in einer Optimierungsfunktion.

Das KI-System verwendet historische Expertenprofile als Trainingslabels.

Das KI-System verwendet erfolgreiche und nicht erfolgreiche Zwischenprofile aus Optimierungsschleifen.

Das KI-System verwendet Simulationsdaten zum Vortraining.

Das KI-System verwendet reale Messdaten zur Kalibrierung eines Simulationsmodells.

Das KI-System verwendet ein Vorwärtsmodell zur Vorhersage des Thermoformergebnisses und einen Optimierer zur inversen Profilsuche.

Das KI-System verwendet Ähnlichkeitssuche, um vergleichbare frühere Verpackungen zu finden.

Das KI-System verwendet CAD-Daten, Tiefenkarten, Werkzeugzeichnungen oder manuell erzeugte Verpackungsmasken.

Das KI-System verarbeitet die Verpackungsgeometrie als Raster, Bild, Punktwolke, Vektordarstellung oder Graph.

Das KI-System kann lokal, cloudbasiert oder hybrid betrieben werden.

Das KI-System kann kundenspezifisch, maschinenspezifisch, materialspezifisch oder allgemein trainiert sein.

Das KI-System kann mit einem Advanced Profile Editor, einer Maschinensteuerung, einer Materialdatenbank, einem Simulationssystem oder einem Qualitätsmesssystem verbunden sein.

## 15. Beispielhafte Ausführungsform

In einer beispielhaften Ausführungsform wird eine neue Verpackung aus einer 350 µm starken PP-Folie optimiert. Der Anwender importiert die CAD-Geometrie der Verpackung in den Advanced Profile Editor. Das System berechnet daraus eine Tiefenkarte, eine Konturmaske, eine Karte der lokalen Ziehverhältnisse und eine Zuordnung zur Pixelmatrix des Matrixheizers.

Der Anwender wählt als Ziel „gleichmäßige Materialverteilung bei ausreichendem Topload“. Das Materialfenster wird aus einer Datenbank geladen oder aus vorherigen Temperaturstufentests übernommen. Das KI-Modell sucht historische Optimierungen mit ähnlicher Geometrie, ähnlicher Foliendicke und gleichem oder ähnlichem Material. Es erzeugt daraus ein initiales Temperaturprofil.

Das Profil wird dem Anwender als Wärmebild angezeigt. Bereiche mit hoher erwarteter Dehnung werden anders temperiert als Bereiche mit geringer erwarteter Dehnung. Das System zeigt zusätzlich eine prognostizierte Wanddickenverteilung und eine Konfidenzkarte. Der Anwender akzeptiert das Profil, passt einen Siegelrandbereich manuell an und überträgt das Profil an den Matrixheizer.

Nach dem Thermoformversuch wird die Wanddickenverteilung gemessen. Das System erkennt, dass zwei Ecken unterhalb der gewünschten Mindestwanddicke liegen. Es schlägt eine lokale Profilkorrektur vor und begründet diese mit vergleichbaren früheren Fällen. Nach einem zweiten Versuch wird die Zielverteilung erreicht. Das finale Profil, die Messwerte und die Bewertung werden als neuer Trainingsfall gespeichert.

## 16. Weiterer beispielhafter Ablauf mit Simulationsdaten

In einer weiteren Ausführungsform liegen für eine neue Verpackungsgeometrie noch keine realen Optimierungsdaten vor. Das System erzeugt zunächst auf Basis des CAD-Modells und der Materialdaten eine virtuelle Versuchsreihe. Dabei werden verschiedene Temperaturprofile simuliert. Ein Simulationsmodell berechnet für jedes Profil eine erwartete Wanddickenverteilung und eine Wahrscheinlichkeit für Defekte.

Aus diesen virtuellen Daten wird ein Surrogatmodell erstellt. Dieses Surrogatmodell wird mit historischen realen Messdaten abgeglichen. Anschließend sucht ein Optimierer dasjenige Profil, das die Wanddickenabweichung minimiert, die Mindestwanddicke einhält und das Verarbeitungsfenster nicht überschreitet. Das gefundene Profil wird als Startprofil für den realen Versuch verwendet. Nach dem realen Versuch werden die Messwerte zur Korrektur des Surrogatmodells genutzt.

## 17. Vorteile der beschriebenen Lösung

Die beschriebene KI-gestützte Profilerzeugung ermöglicht eine schnellere Erstellung geeigneter Temperaturprofile für pixelbasierte Matrixheizer. Sie reduziert die Zahl der erforderlichen Versuche, macht historisches Erfahrungswissen systematisch nutzbar und unterstützt Anwender, die nicht über langjährige Expertenerfahrung in der manuellen Profilierung verfügen. Es wird dadurch die Schwelle für notwendiges Anwenderwissen herabgesetzt.

Gleichzeitig kann die Lösung die Qualität der Thermoformergebnisse verbessern. Durch die Berücksichtigung von Material, Geometrie, Foliendicke und Optimierungsziel können Profile erzeugt werden, die gezielt auf gleichmäßige Materialverteilung, hohen Topload, definierte Haptik oder Materialeinsparung ausgelegt sind.

Die Lösung unterstützt außerdem eine bessere Dokumentation und Wiederverwendung von Optimierungswissen. Jede Packungsoptimierung wird zu einem strukturierten Datensatz, der künftige Optimierungen beschleunigen kann. Dadurch entsteht ein lernendes System, das mit jeder durchgeführten Optimierung wertvoller wird.

## 18. Entwicklungsweg zur Umsetzung

Ein möglicher Entwicklungsweg beginnt mit der Standardisierung der Datenerfassung. Historische und neue Packungsoptimierungen werden in ein einheitliches Datenmodell überführt. Dabei werden Materialdaten, Geometrieinformationen, Prozessparameter, Temperaturprofile, Messergebnisse und Expertenbewertungen zusammengeführt.

Im nächsten Schritt wird eine Datenbank aufgebaut, die Optimierungsfälle versioniert speichert. Zu jedem Profil wird dokumentiert, für welche Verpackung, welches Material, welche Maschine und welches Ziel es verwendet wurde und welches Ergebnis erreicht wurde.

Darauf folgt ein Basissystem zur Ähnlichkeitssuche. Dieses System findet frühere Optimierungen, die einer neuen Aufgabe ähneln, und verwendet deren Profile als Startpunkt. Bereits diese Stufe kann die manuelle Profilerstellung erheblich unterstützen.

Anschließend wird ein erstes überwachtes KI-Modell trainiert, das aus Geometrie, Material, Foliendicke und Optimierungsziel ein Temperaturprofil erzeugt. Dieses Modell wird zunächst offline mit historischen Daten validiert. Die erzeugten Profile werden mit Expertenprofilen und realen Ergebnissen verglichen.

In einem weiteren Schritt wird das Modell in den Advanced Profile Editor integriert. Der Anwender kann KI-Vorschläge erzeugen, prüfen, bearbeiten und speichern. Feedback aus realen Versuchen wird strukturiert zurückgeführt.

Danach können Simulationsdaten ergänzt werden. Ein digitales Thermoformmodell oder ein Surrogatmodell erzeugt virtuelle Trainingsdaten und unterstützt die Suche nach Profilen für neue Geometrien oder Materialien. Schließlich kann ein kontinuierlicher Lernprozess etabliert werden, bei dem freigegebene neue Optimierungsfälle regelmäßig zur Verbesserung des Modells genutzt werden.

## 19. Zusammenfassung der Offenbarung

Offenbart wird ein computerimplementiertes Verfahren, ein Softwaresystem und ein zugehöriges Datenmodell zur KI-gestützten Generierung von Temperaturprofilen für pixelbasierte Matrixheizsysteme beim Thermoformen. Das System verarbeitet Daten zu Folienmaterial, Foliendicke, materialspezifischem Verarbeitungsfenster, Verpackungsgeometrie, Prozessparametern und Optimierungsziel. Es nutzt historische Packungsoptimierungen und optional Simulationsdaten, um für eine neue Verpackung oder eine neue Folie ein Temperaturprofil, ein Korrekturprofil, ein zeitabhängiges Profil oder mehrere alternative Profile zu erzeugen. Das Profil kann im Advanced Profile Editor angezeigt, bearbeitet, getestet und anhand realer Messergebnisse weiter optimiert werden. Die erzielten Ergebnisse können wiederum als Trainingsdaten gespeichert werden, sodass ein kontinuierlich lernendes System entsteht.

Die technische Wirkung liegt insbesondere in der automatisierten oder assistierten Erzeugung geeigneter Temperatur-Sollwerte für eine Vielzahl separat ansteuerbarer Heizpixel, der Reduzierung manueller Iterationen, der systematischen Nutzung historischer Optimierungsdaten, der Berücksichtigung materialspezifischer Grenzen und der zielabhängigen Verbesserung des Thermoformergebnisses.