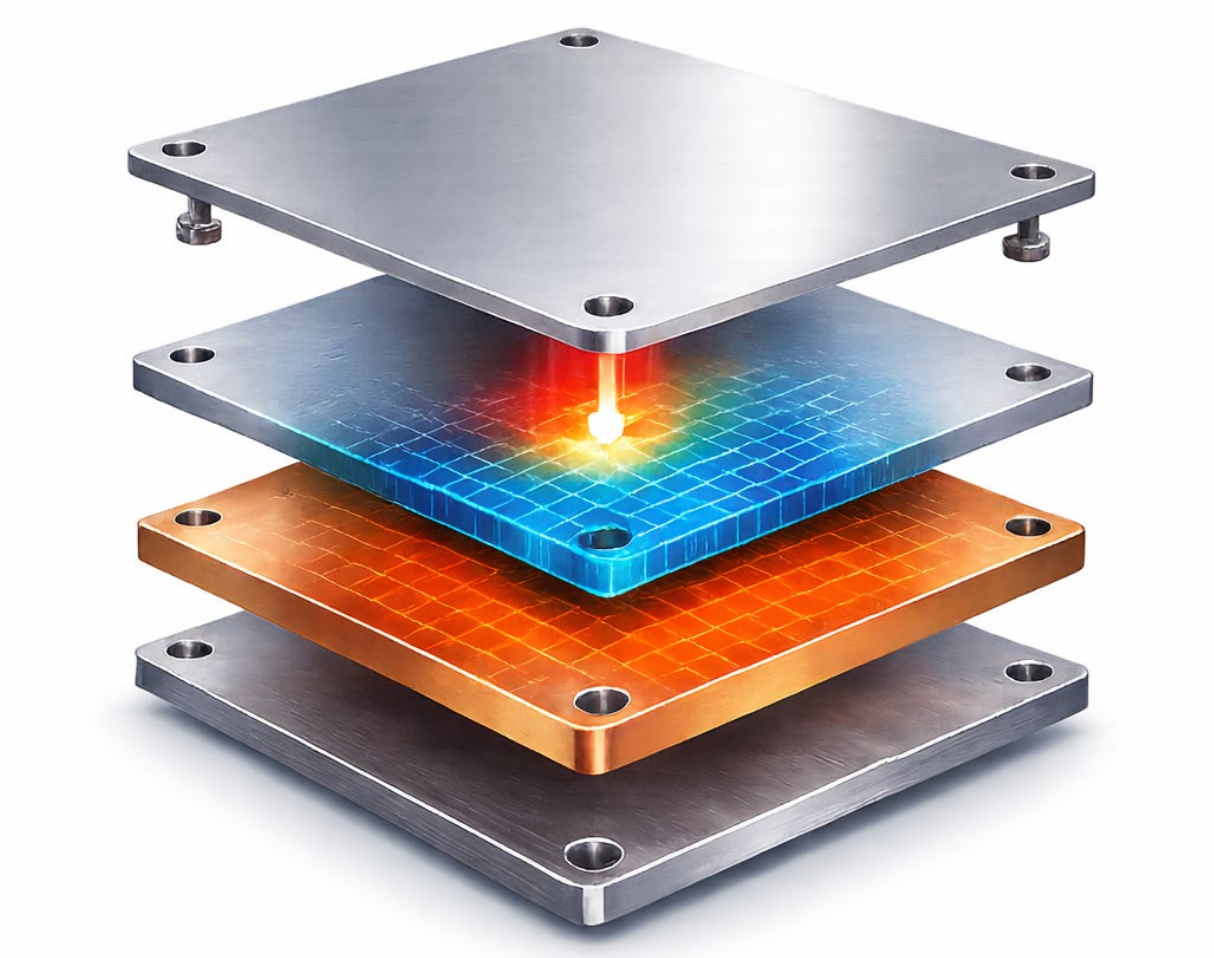
Revolit Thermische Architektur für aktive Wärmeplatten

Grundlagen, physikalische Modelle und Engineering-Prinzipien multilayer thermischer Systeme Version 1.0



Handbuch 2026-12540-211-A

Version 1C, Januar 2026

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

Inhalt

Abstract 5
1. Einleitung 6
2. Grundbegriff der thermischen Architektur 8
2.1 Definition 8
2.2 Wärmeplatte als System und nicht als Werkstoff 8
2.3 Zielgrößen einer thermischen Architektur 9
3. Architekturklassifikation 10
3.1 Class 0: monolithisches Aluminium 10
3.2 Class I: monolithischer Edelstahl 10
3.3 Class II: RevoTHERM® 11
3.4 Class III: RevoCORE® 11
3.5 Class IV: RevoDUR® 12
3.6 Class V: RevoLAB® 12
4. Schichtlogik und funktionale Arbeitsteilung 13
4.1 Grundprinzip 13
4.2 Kernfunktion 13
4.3 Skinfunktion 13
4.4 Symmetrie 14
4.5 Asymmetrie 14
5. Grundgleichungen der Wärmeleitung 14
5.1 Fouriersches Gesetz 14
5.2 Energieerhaltung in differentieller Form 15
5.3 Bedeutung der Diffusivität 15
6. Anisotropie mehrschichtiger Architekturen 16
6.1 Warum Multilayer Systeme anisotrop sind 16
6.2 Leitfähigkeitstensor 16
6.3 Laterale effektive Wärmeleitfähigkeit 16
6.4 Vertikale effektive Wärmeleitfähigkeit 16
6.5 Konsequenz 17
7. Effektive Wärmeleitfähigkeit als Architekturkenngröße 18
7.1 Grundidee 18
7.2 Beispielhafte Relevanz 18
7.3 Grenzen einfacher Mittelwertbildung 18
7.4 Warum dieser Kennwert trotzdem strategisch wichtig ist 18

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

8. Laterale Wärmeverteilung und Homogenität 19
8.1 Problem lokaler Wärmeeinträge 19
8.2 Physikalische Bedeutung der lateralen Leitung 19
8.3 Idealisierte zweidimensionale Diffusion 19
8.4 Homogenisierungszeit 19
8.5 Praktische Relevanz 20
9. Vertikaler Wärmewiderstand und der häufigste Denkfehler 21
9.1 Der klassische Ansatz 21
9.2 Warum dieser Ansatz allein nicht genügt 21
9.3 Der architektonische Denkfehler 21
9.4 Konsequenz 22
10. Thermische Diffusivität als dynamische Schlüsselgröße 23
10.1 Definition 23
10.2 Warum Diffusivität mehr ist als Leitfähigkeit 23
10.3 Laterale effektive Diffusivität 23
11. Wärmestromdichte, Temperaturgradient und Leistung 24
11.1 Wärmestromdichte 24
11.2 Temperaturgradient 24
11.3 Zusammenhang mit Architektur 24
12. Thermisch induzierte Spannungen 25
12.1 Grundgleichung 25
12.2 Bedeutung in Multilayer Systemen 25
12.3 Freie thermische Dehnung 25
12.4 Bedeutung der Symmetrie 25
12.5 Lokale Temperaturgradienten als Spannungsursache 25
13. Mechanische Logik thermischer Architekturen 26
13.1 Wärmeplatte als thermo mechanisches Bauteil 26
13.2 Rolle des Elastizitätsmoduls 26
13.3 Biegesteifigkeit 26
13.4 Restspannungen 26
14. Werkstoffgruppen und ihre architektonische Funktion 27
14.1 Aluminiumkern 27
14.2 Kupferkern 27
14.3 Edelstahlskins 27
14.4 Baustahl in Class II 27
15. Schichtdicke als eigenständiger Entwurfsparameter 28

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

15.1 Warum Dicke nicht nur Masse bedeutet 28
15.2 Skinstärken 28
15.3 Gesamtdicke 28
16. Oberfläche als thermische und funktionale Randbedingung 29
16.1 Oberfläche ist nicht nur Optik 29
16.2 Oberflächenzustände 29
16.3 Dünne Oberflächenschichten 29
17. Induktive Erwärmung und Skin Depth 30
17.1 Grundlagen 30
17.2 Bedeutung für thermische Architekturen 30
17.3 Architektur statt Einzelkennwert 30
18. Thermische Masse, Energiebedarf und Aufheizzeit 31
18.1 Grundenergie 31
18.2 Aufheizzeit 31
18.3 Zusammenhang mit Architektur 31
19. Leitfähigkeitsdichte und geometrische Effizienz 32
19.1 Motivation 32
19.2 Aussagekraft 32
19.3 Technische Relevanz 32
20. Warum Architektur größer ist als Materialmenge 33
21. Thermische Architektur als Entwicklungslogik 33
22. Einordnung der Revolit Architekturklassen 34
22.1 RevoTHERM® 34
22.2 RevoCORE® 34
22.3 RevoDUR® 34
22.4 RevoLAB® 34
23. Technische Bedeutung für OEM und Entwicklungsabteilungen 35
24. Grenzen und notwendige Vertiefungen 35
25. Schlussfolgerung 36
26. Formelanhang 37
27. Begriffsdefinitionen 39
28. Executive Summary für Management und CTO 40

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

Abstract

Die technische Leistungsfähigkeit industrieller Wärmeplatten wird in der Praxis häufig unzureichend beschrieben. In vielen Anwendungen dominiert bis heute ein vereinfachtes Materialdenken, bei dem Wärmeleistung primär mit der Wahl eines einzelnen Werkstoffs, mit der absoluten Werkstoffdicke oder mit tabellierten Einzelkennwerten wie der Wärmeleitfähigkeit eines homogenen Metalls erklärt wird. Diese Sichtweise greift für aktive thermische Systeme jedoch zu kurz. Eine industrielle Wärmeplatte ist kein reines Materialobjekt, sondern ein funktionales thermisches System, dessen Verhalten aus dem Zusammenspiel von Schichtarchitektur, Werkstoffkombination, lateraler Wärmeleitung, vertikalem Wärmewiderstand, thermischer Diffusivität, Grenzflächen, Geometrie, Heizzonierung, Oberflächenzustand und Lastfall resultiert.

Dieses Whitepaper führt daher den Begriff der **thermischen Architektur** als primären ingenieurwissenschaftlichen Bezugsrahmen ein. Die Grundthese lautet, dass die Leistungsfähigkeit aktiver Wärmeplatten nicht hinreichend durch den Werkstoff allein beschrieben werden kann, sondern durch die **gezielte Verteilung thermischer Funktionen innerhalb einer Architektur**. Insbesondere bei mehrschichtigen Metallverbunden entstehen Systemeigenschaften, die aus den Einzelwerkstoffen isoliert nicht ableitbar sind. Eine Platte kann mechanische, thermische, hygienische, induktive und oberflächentechnische Funktionen gleichzeitig erfüllen, wenn diese Funktionen architektonisch über Schichtaufbau und Materialverteilung definiert werden.

Zur systematischen Beschreibung wird eine Architekturklassifikation in fünf Klassen eingeführt. Diese reicht von monolithischem Aluminium als Referenz hoher Wärmeleitfähigkeit ohne Mehrschichtlogik bis hin zu komplexen Multimehrschichtsystemen mit mehreren funktionalen Ebenen. Innerhalb dieses Rahmens werden insbesondere **RevoTHERM®**, **RevoCORE®**, **RevoDUR®** und **RevoLAB®** als architekturell definierte Klassen beschrieben.

Das Whitepaper zeigt, dass die thermische Performance aktiver Wärmeplatten wesentlich von der **effektiven lateralen Wärmeleitfähigkeit** und der **lateralen thermischen Diffusivität** bestimmt wird. Diese Größen beeinflussen die Geschwindigkeit und Qualität der Temperaturhomogenisierung, die lokale Übertemperatur, die nutzbare Leistungsdichte, die Regelbarkeit sowie die Energieeffizienz. Ein verbreiteter Denkfehler besteht darin, die Performance primär über den vertikalen Wärmewiderstand einzelner Schichten zu bewerten. Für aktive Wärmeplatten ist dieser Ansatz allein nicht ausreichend, da die eigentliche Funktion typischerweise nicht nur im Durchleiten von Wärme durch die Dicke, sondern vor allem im **lateralen Verteilen und Homogenisieren** von Wärme über die Nutzfläche besteht.

Neben den thermischen Grundlagen behandelt das Whitepaper auch mechanische und betriebliche Aspekte mehrschichtiger Systeme, darunter thermisch induzierte Spannungen, Symmetrie der Architektur, Schichtdicken, Werkstoffkombinationen, Oberflächensysteme, Belastungsprofile sowie die Bedeutung von Schnittstellen für die industrielle Auslegung. Ziel ist es, einen konsistenten, physikalisch belastbaren und industriell nutzbaren Bezugsrahmen zu schaffen, der als Basis für weitere Whitepaper, Engineering Tools, Produktspezifikationen und OEM Kommunikation dient.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

1. Einleitung

Industrielle Wärmeplatten übernehmen in zahlreichen Anwendungen eine zentrale Funktion. Sie dienen als aktive thermische Plattformen in Kochsystemen, Heizmodulen, Kühlsystemen, Kontaktwärmeübertragern, Verpackungsmaschinen, Laborgeräten, Thermoprozesssystemen, Trocknungsanlagen und mechatronischen Baugruppen. Trotz ihrer breiten Anwendung werden sie in vielen Entwicklungsprozessen noch immer mit einer überraschend simplen Logik behandelt. Die Frage lautet häufig lediglich: Welches Metall soll verwendet werden und wie dick soll die Platte sein.

Diese Denkweise ist aus mehreren Gründen problematisch.

Erstens beschreibt ein tabellierter Materialkennwert nur das Verhalten eines idealisierten homogenen Werkstoffs unter definierten Randbedingungen. Eine reale industrielle Wärmeplatte ist jedoch in der Regel kein unendliches homogenes Volumen, sondern ein endliches Bauteil mit Randverlusten, Heizzonen, örtlichen Wärmesenken, Kontaktflächen, Oberflächenbeschichtungen, Dickentoleranzen, mechanischer Vorspannung und prozessbedingten Lastwechseln.

Zweitens wird in vielen Anwendungen übersehen, dass nicht nur der Wärmestrom durch die Dicke relevant ist, sondern vor allem die Fähigkeit der Platte, eingebrachte Wärme **in der Ebene der Platte** zu verteilen. Eine Wärmequelle wirkt häufig lokal oder zonal. Der technische Nutzen entsteht erst dann, wenn diese lokal eingebrachte Wärme über die aktive Oberfläche zu einer möglichst homogenen Temperaturverteilung geführt wird. Genau an dieser Stelle versagen viele monolithische Architekturen oder erreichen nur mit unverhältnismäßiger Masse und Trägheit ausreichende Ergebnisse.

Drittens bestehen moderne thermische Anforderungen selten nur aus einem einzigen Ziel. Eine industrielle Platte soll oft gleichzeitig eine gute Wärmeverteilung, mechanische Stabilität, definierte Oberflächenhärte, Korrosionsbeständigkeit, Reinigbarkeit, Lebensdauer, Zerspanbarkeit, Schweißbarkeit oder Induktionseignung aufweisen. Diese Kombination widersprüchlicher Anforderungen lässt sich mit einem Einzelwerkstoff oft nur unzureichend erfüllen. Hier entsteht die Notwendigkeit einer architekturbasierten Betrachtung.

Die zentrale These dieses Whitepapers lautet daher:

Eine aktive Wärmeplatte ist kein Material, sondern eine thermische Architekturplattform.

Der Begriff Architektur ist bewusst gewählt. Wie in der Tragwerksplanung oder Mikroelektronik geht es nicht primär um die isolierte Eigenschaft eines Bestandteils, sondern um die funktionale Organisation des Gesamtsystems. In thermischen Metallplatten bedeutet Architektur die gezielte Anordnung von Werkstoffen und Schichten mit dem Ziel, einen gewünschten Gesamtzustand zu erzeugen.

Im Kern beantwortet die thermische Architektur folgende Fragen:

Welche Schichten übernehmen die laterale Wärmeverteilung
Welche Schichten übernehmen die mechanische Tragfunktion
Welche Schichten definieren die Oberfläche
Welche Schichten beeinflussen Induktion, Härte, Hygiene oder chemische Beständigkeit
Wie wird Symmetrie hergestellt oder bewusst gebrochen
Wie werden Wärmestrom, Temperaturhomogenität und Spannungen im Gesamtsystem balanciert

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

Die Architekturperspektive verschiebt damit den Fokus von der Frage
Welches Material ist gut
hin zur Frage
Welche Schichtstruktur erfüllt den Lastfall optimal

Dieses Whitepaper schafft dafür den theoretischen und technischen Rahmen. Es definiert die thermische Architekturklassifikation, die grundlegenden physikalischen Modelle, die Rolle effektiver Kennwerte, die Bedeutung von Symmetrie und die technische Logik moderner Mehrschichtsysteme.

---

2. Grundbegriff der thermischen Architektur

2.1 Definition

Unter thermischer Architektur wird die gezielte funktionale Strukturierung einer Wärmeplatte verstanden, bei der verschiedene Schichten, Werkstoffe und Grenzflächen so kombiniert werden, dass ein definierter thermischer, mechanischer und betrieblicher Leistungszustand entsteht.

Die thermische Architektur umfasst insbesondere:

Materialauswahl
Schichtanzahl
Schichtreihenfolge
Schichtdicken
Symmetrie oder Asymmetrie
Kopplung der Schichten
Geometrie der Platte
Oberflächensysteme
Heizprinzip
Belastungsprofil
Randbedingungen des Einsatzes

Der Begriff Architektur ist damit umfassender als Werkstoffauswahl. Zwei Platten können die gleiche Gesamtdicke besitzen und an der Oberfläche gleich aussehen, jedoch aufgrund ihrer inneren Struktur ein grundlegend unterschiedliches thermisches Verhalten aufweisen.

2.2 Wärmeplatte als System und nicht als Werkstoff

Ein monolithischer Werkstoff wird durch eine begrenzte Anzahl intrinsischer Kennwerte beschrieben, etwa Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Wärmekapazität, Elastizitätsmodul oder thermischer Ausdehnungskoeffizient. Diese Kennwerte sind wichtig, reichen aber für die Systembewertung einer aktiven Wärmeplatte nicht aus.

Eine Wärmeplatte ist ein gekoppeltes System aus:

Energieeintrag
Wärmeverteilung
Wärmespeicherung
Wärmeabgabe
mechanischer Verformung
Oberflächenkontakt
Regelung
prozessbedingter Last

Das reale Verhalten hängt damit nicht nur von Materialdaten ab, sondern von deren räumlicher Verteilung. Ein hochleitfähiger Kern kann beispielsweise die laterale Wärmeverteilung dominieren, während dünne Edelstahlskins die Oberfläche definieren. Der Systemwert ist dann nicht identisch mit dem eines einzelnen Werkstoffs, sondern entsteht als Effektivverhalten der Architektur.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

2.3 Zielgrößen einer thermischen Architektur

Eine thermische Architektur ist dann technisch sinnvoll, wenn sie definierte Zielgrößen optimiert. Dazu gehören insbesondere:

möglichst homogene Oberflächentemperatur
hohe laterale Wärmeverteilung
kontrollierter vertikaler Wärmedurchgang
hohe Regelbarkeit
geringe lokale Übertemperaturen
reduzierte Aufheizzeit
begrenzte Masse
mechanische Stabilität
geringer Verzug
hohe Zyklenfestigkeit
geeignete Oberfläche für den Prozess
wirtschaftliche Herstellbarkeit

Bereits diese Liste zeigt, dass Wärmeplatten nicht eindimensional optimiert werden können. Eine reine Maximierung der Wärmeleitfähigkeit wäre oft ebenso unzureichend wie eine reine Maximierung der Masse oder der Härte. Der technische Kern liegt in der architektonischen Balance.

---

3. Architekturklassifikation

Zur systematischen Beschreibung thermischer Systeme wird eine Klassifikation in fünf Klassen eingeführt.

3.1 Class 0: monolithisches Aluminium

Class 0 beschreibt monolithische Aluminiumplatten als Referenzarchitektur für hohe Wärmeleitfähigkeit ohne Mehrschichtaufbau. Typischer Vertreter ist EN AW 1050.

Merkmale:

einlagig
hohe Wärmeleitfähigkeit
geringe Dichte
gute laterale Wärmeverteilung
geringe Oberflächenhärte
begrenzte Verschleißfestigkeit
typisch gute Temperaturhomogenisierung bei geringer Masse

Class 0 ist wichtig, weil Aluminium in vielen thermischen Anwendungen als natürlicher Referenzwerkstoff betrachtet wird. Diese Klasse stellt die Frage nach hoher Leitfähigkeit ohne architektonische Funktionstrennung. Sie ist kein mehrschichtiges System, sondern der Referenzpunkt für eine hohe intrinsische Leitfähigkeit.

3.2 Class I: monolithischer Edelstahl

Class I beschreibt monolithische Edelstahlplatten. Typische Güten sind 304, 316L, 316Ti, 430 oder 436.

Merkmale:

einlagig
niedrige bis mittlere Wärmeleitfähigkeit
hohe Korrosionsbeständigkeit
gute Oberflächenstabilität
oft hygienisch vorteilhaft
begrenzte laterale Wärmeverteilung
erhöhtes Risiko lokaler Temperaturgradienten bei punktuellem Heizeintrag

Class I ist in vielen realen Anwendungen technisch robust, aber thermisch begrenzt. Gerade bei großen Flächen oder hohem Homogenitätsanspruch stoßen monolithische Edelstahlplatten an physikalische Grenzen.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

3.3 Class II: RevoTHERM®

Class II beschreibt eine zweischichtige Architektur aus Edelstahl und Baustahl.

Typischer Aufbau:

Edelstahl
Baustahl

Mögliche Baustähle:

S235
S355

Merkmale:

zweilagig
funktionale Trennung zwischen Oberfläche und strukturellem Träger
höhere architektonische Komplexität als monolithische Systeme
thermisch zwischen Edelstahl und hochleitfähigen Kernsystemen
mechanisch robust
für bestimmte Anwendungen wirtschaftlich attraktiv

RevoTHERM® ist keine bloße Materialkombination, sondern eine funktionale Architekturklasse. Edelstahl kann die prozessseitige Oberfläche definieren, während Baustahl mechanische und wirtschaftliche Vorteile einbringt. Thermisch entsteht ein Systemverhalten, das nicht mehr mit einem Einzelwerkstoff gleichgesetzt werden kann.

3.4 Class III: RevoCORE®

Class III beschreibt eine dreischichtige Architektur mit hochleitfähigem Aluminiumkern und Edelstahlskins.

Typischer Aufbau:

Edelstahl
Aluminium
Edelstahl

Typischer Kern:

EN AW 1050

Typische Skinstärken:

1 mm
1.5 mm
2 mm
2.5 mm

Merkmale:

dreischichtig
symmetrische Architektur
hohe laterale Wärmeverteilung
gute Oberflächenfunktion
hohe strukturelle Balance

deutlich verbesserte Homogenisierung gegenüber monolithischem Edelstahl
technisch besonders relevant für aktive Wärmeplatten

RevoCORE® ist eine architekturbasierte Lösung für den Zielkonflikt zwischen thermischer Verteilung und oberflächenseitiger Funktion. Der Aluminiumkern übernimmt primär die laterale Wärmeverteilung. Die Edelstahlskins definieren mechanische und prozessseitige Eigenschaften der Oberfläche.

3.5 Class IV: RevoDUR®

Class IV beschreibt eine dreischichtige Architektur mit Kupferkern und Edelstahlskins.

Typischer Aufbau:

Edelstahl
Kupfer
Edelstahl

Typischer Kern:

high purity copper

Merkmale:

dreischichtig
symmetrische Hochleistungsarchitektur
sehr hohe laterale Wärmeleitfähigkeit
sehr hohe thermische Diffusivität
potenziell höchste Homogenisierungsleistung unter den dreischichtigen Serienarchitekturen
erhöhte Anforderungen an Herstellung, Kosten und Spannungsmanagement

RevoDUR® erweitert die architektonische Logik von RevoCORE® in Richtung maximaler Leitfähigkeit und Diffusivität. Diese Klasse ist für Hochleistungsanwendungen relevant, bei denen extreme Homogenität oder schnelle Wärmeverteilung gefordert sind.

3.6 Class V: RevoLAB®

Class V beschreibt Multimehrschichtsysteme mit fünf oder mehr funktionalen Lagen.

Merkmale:

fünf oder mehr Lagen
bewusst funktionalisierte Architektur
nicht zwingend symmetrisch
mehrere thermische, mechanische, elektrische oder chemische Funktionsschichten möglich
geeignet für hochspezialisierte Systeme

RevoLAB® ist als Klasse entscheidend, weil hier Architektur nicht mehr nur als Kern Skin Logik verstanden wird, sondern als **gezielte mehrdimensionale Funktionsintegration**. Möglich sind beispielsweise zusätzliche Sperrschichten, Haftvermittler, induktionsrelevante Schichten, verschleißrelevante Decklagen oder speziell ausgelegte Zwischenschichten.

---

4. Schichtlogik und funktionale Arbeitsteilung

4.1 Grundprinzip

Die zentrale Stärke mehrschichtiger thermischer Architekturen liegt in der funktionalen Arbeitsteilung. Unterschiedliche Schichten übernehmen unterschiedliche Rollen. Die Gesamtleistung ergibt sich aus der Kopplung dieser Funktionen.

Typische Rollen sind:

laterale Wärmeverteilung
vertikaler Wärmedurchgang
mechanische Tragfunktion
Oberflächenhärte
Korrosionsbeständigkeit
Reinigbarkeit
Induktionseignung
Schweißbarkeit
Bearbeitbarkeit
Widerstand gegen thermische Zyklen

4.2 Kernfunktion

Der Kern übernimmt in vielen Architekturen die primäre Rolle der lateralen Wärmeverteilung. Sein Beitrag zur Performance ist besonders hoch, wenn

seine Wärmeleitfähigkeit hoch ist
sein Flächenanteil in der Dicke groß ist
die Kopplung zu den Deckschichten gut ist

Bei RevoCORE® übernimmt Aluminium diese Funktion. Bei RevoDUR® wird sie durch Kupfer noch stärker ausgeprägt.

4.3 Skinfunktion

Die Deckschichten oder Skins definieren typischerweise

die prozessseitige Oberfläche
die chemische Beständigkeit
die Härte
das Reinigungsverhalten
die tribologische Charakteristik
die mechanische Stabilisierung des Systems

Die Skin muss thermisch nicht zwingend dominant sein. Selbst bei geringerer Leitfähigkeit kann sie architektonisch essenziell sein, weil sie die Nutzoberfläche definiert und die Funktionalität des Gesamtsystems absichert.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

4.4 Symmetrie

Eine symmetrische Architektur besitzt auf beiden Seiten denselben oder einen spiegelbildlich äquivalenten Aufbau.

Bei einem ideal symmetrischen Dreischichtsystem gilt beispielsweise:

t_skin,oben = t_skin,unten
Material_oben = Material_unten

Symmetrie ist mechanisch und thermisch wichtig, weil sie das Risiko ungleichmäßiger Dehnung reduziert. Bei Temperaturwechseln führt eine unsymmetrische Architektur leichter zu Biegemomenten und Verzug. Symmetrische Systeme sind daher für aktive Wärmeplatten besonders attraktiv.

4.5 Asymmetrie

Asymmetrische Systeme können technisch sinnvoll sein, wenn verschiedene Oberflächenfunktionen gezielt unterschiedlich ausgelegt werden sollen. Dies erhöht jedoch die Anforderungen an Spannungsmanagement, Prozessführung und geometrische Stabilität. RevoLAB® bietet hier den architektonischen Raum für bewusste Asymmetrien.

---

5. Grundgleichungen der Wärmeleitung

Die physikalische Beschreibung thermischer Architekturen beginnt mit den Grundgleichungen der Wärmeleitung.

5.1 Fouriersches Gesetz

Das Fouriersche Gesetz beschreibt die lineare Beziehung zwischen Wärmestromdichte und Temperaturgradient:

$q = -k \nabla T$

mit

q = Wärmestromdichte in W pro m^2
k = Wärmeleitfähigkeit in W pro mK
∇T = Temperaturgradient in K pro m

In eindimensionaler Form ergibt sich:

$q = -k \, dT/dx$

oder für den Gesamtwärmestrom durch eine Fläche A:

$\dot{Q} = -k \, A \, dT/dx$

Diese Gleichung zeigt, dass der Wärmestrom steigt, wenn

die Wärmeleitfähigkeit steigt
die Fläche steigt
der Temperaturgradient steigt

Für reale Wärmeplatten ist jedoch entscheidend, dass Wärmeleitung nicht nur eindimensional durch die Dicke erfolgt, sondern in der Regel dreidimensional mit starker lateraler Komponente.

5.2 Energieerhaltung in differentieller Form

Die instationäre Wärmeleitung folgt aus Energieerhaltung und Fourier:

$$\rho c_p \partial T/\partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}_v$$

mit

ρ = Dichte
c_p = spezifische Wärmekapazität
T = Temperatur
t = Zeit
$\dot{q}_v$ = volumetrische Wärmequelle

Für isotropes Material mit konstantem k vereinfacht sich dies zu

$$\partial T/\partial t = \alpha \nabla^2 T + \dot{q}_v / (\rho c_p)$$

mit der thermischen Diffusivität

$$\alpha = k / (\rho c_p)$$

Die thermische Diffusivität ist eine Schlüsselfunktion für aktive Wärmeplatten. Sie beschreibt, wie schnell sich Temperaturänderungen im Material ausbreiten.

5.3 Bedeutung der Diffusivität

Ein Material oder eine Architektur mit hoher Wärmeleitfähigkeit, aber gleichzeitig sehr hoher volumetrischer Wärmespeicherung, reagiert anders als ein System mit hoher Diffusivität. Für die Dynamik der Temperaturhomogenisierung ist daher nicht nur k, sondern insbesondere α relevant.

Eine Architektur mit hoher lateraler Diffusivität führt Wärme nicht nur gut, sondern verteilt Temperaturänderungen zeitlich schnell über die Fläche. Genau deshalb ist Diffusivität eine zentrale Größe in der Beurteilung aktiver Wärmeplatten.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

6. Anisotropie mehrschichtiger Architekturen

6.1 Warum Multilayer Systeme anisotrop sind

Monolithische Materialien werden häufig als isotrop behandelt. In mehrschichtigen Architekturen gilt dies nur eingeschränkt. Selbst wenn jede Einzelschicht isotrop ist, entsteht durch die Schichtstruktur ein richtungsabhängiges Effektivverhalten.

In der Plattenebene wirken Schichten weitgehend parallel.
Durch die Dicke wirken sie seriell.

Deshalb unterscheiden sich typischerweise

laterale effektive Wärmeleitfähigkeit
und
vertikale effektive Wärmeleitfähigkeit

6.2 Leitfähigkeitstensor

Das effektive Verhalten kann tensorförmig beschrieben werden:

K = diag(k_xy, k_xy, k_z)

mit

k_xy = effektive laterale Wärmeleitfähigkeit
k_z = effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit

Bereits diese Darstellung zeigt, dass eine Wärmeplatte physikalisch nicht mehr durch einen einzigen skalaren k Wert angemessen beschrieben wird.

6.3 Laterale effektive Wärmeleitfähigkeit

Für ideal gekoppelte Schichten, die in der Ebene parallel wirken, ergibt sich näherungsweise:

k_xy,eff = Σ(k_i t_i) / Σ(t_i)

mit

k_i = Wärmeleitfähigkeit der Schicht i
t_i = Dicke der Schicht i

Diese Gleichung ist für die thermische Architektur zentral. Sie zeigt, dass hochleitfähige Kerne die laterale Gesamtleistung massiv dominieren können, wenn sie einen signifikanten Dickenanteil besitzen.

6.4 Vertikale effektive Wärmeleitfähigkeit

Durch die Dicke wirken die Schichten seriell. Daher gilt näherungsweise:

k_z,eff = L_total / Σ(t_i / k_i)

mit

L_total = Gesamtdicke = Σ t_i

Diese Gleichung entspricht dem harmonischen Mittel für seriell geschaltete Wärmeleitwiderstände.

6.5 Konsequenz

Bei mehrschichtigen Wärmeplatten gilt typischerweise:

$k_{xy,eff} > k_{z,eff}$

oder allgemeiner:

die Architektur besitzt ein richtungsabhängiges Leitverhalten.

Das ist kein Nachteil, sondern bei aktiven Wärmeplatten oft genau der gewünschte Effekt. Ziel ist nicht maximale Wärmeleitung in jede Richtung, sondern gezielte Funktionsverteilung. Für die Homogenisierung der Oberfläche ist hohe laterale Leitung besonders wertvoll.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

7. Effektive Wärmeleitfähigkeit als Architekturkenngröße

7.1 Grundidee

Die effektive Wärmeleitfähigkeit ist kein echter Materialkennwert, sondern ein abgeleiteter Systemkennwert. Sie beschreibt, wie sich eine mehrschichtige Architektur im Mittel verhält.

Für die Praxis ist sie trotzdem hochrelevant, weil sie einen Vergleich zwischen Architekturen ermöglicht, sofern klar angegeben wird, auf welche Richtung und welche Annahmen sich der Wert bezieht.

7.2 Beispielhafte Relevanz

Ein Dreischichtsystem mit dünnen Edelstahlskins und dickem Aluminiumkern kann eine laterale effektive Leitfähigkeit besitzen, die weit über der eines monolithischen Edelstahls liegt, obwohl die Oberfläche aus Edelstahl besteht.

Genau dieser Punkt ist architektonisch entscheidend:

Die prozessseitige Oberfläche und die thermisch dominante Schicht müssen nicht identisch sein.

7.3 Grenzen einfacher Mittelwertbildung

Die Gleichung

$k_{xy,eff} = \Sigma(k_i t_i) / \Sigma(t_i)$

ist eine idealisierte Näherung. Sie setzt voraus:

perfekte Bindung der Schichten
vernachlässigbare Grenzflächenwiderstände
homogene Temperaturverteilung über die Dicke der Einzelschichten
lineares Materialverhalten
keine Delamination
keine ausgeprägten lokalen Störeffekte

Für technische Erstbewertungen ist diese Näherung sehr nützlich. Für hochpräzise Auslegungen müssen jedoch zusätzlich Grenzflächen, Temperaturabhängigkeit der Werkstoffe, reale Heizprofile und Randverluste berücksichtigt werden.

7.4 Warum dieser Kennwert trotzdem strategisch wichtig ist

Trotz seiner Vereinfachung ist $k_{xy,eff}$ eine der wichtigsten Größen der Thermal Architecture Methodologie, weil er erstmals erlaubt, eine Architektur primär über ihre **verteilungsrelevante Funktion** zu bewerten und nicht nur über den Rohstoff.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

8. Laterale Wärmeverteilung und Homogenität

8.1 Problem lokaler Wärmeeinträge

In realen Systemen wird Wärme selten ideal flächig eingebracht. Typischer sind

Heizstäbe
Kartuschenheizer
induktive Zonen
Gasbrenner mit lokalem Flammenbild
Kontaktpunkte
begrenzte Wärmequellen

Das bedeutet: Die Wärme entsteht lokal und muss sich von dort aus über die Platte verteilen.

8.2 Physikalische Bedeutung der lateralen Leitung

Die Qualität dieser Verteilung hängt stark von der lateralen Leitfähigkeit und Diffusivität ab. Ist k_xy klein, entstehen heiße Zonen in Quellennähe und kältere Randbereiche. Ist k_xy hoch, nivellieren sich Unterschiede schneller.

8.3 Idealisierte zweidimensionale Diffusion

Für eine punktförmige Wärmeanregung in einer idealisierten Ebene ergibt sich formal eine Lösung des Diffusionsproblems der Form:

$$T(r,t) = (Q / (4\pi \alpha_{xy} t)) \exp(-r^2 / (4 \alpha_{xy} t))$$

mit

r = radialer Abstand
t = Zeit
Q = eingebrachte Wärmemenge
α_xy = laterale thermische Diffusivität

Diese Lösung ist stark idealisiert, illustriert aber den Kern:
Je größer α_xy, desto schneller verbreitert sich das Temperaturfeld und desto schneller nimmt lokale Übertemperatur ab.

8.4 Homogenisierungszeit

Die charakteristische Zeit, bis sich ein Temperaturunterschied über eine Strecke L nivelliert, skaliert grob mit

$$\tau \sim L^2 / \alpha_{xy}$$

Diese Beziehung ist für die Ingenieurpraxis enorm wichtig. Sie zeigt:

große Fläche erhöht die notwendige Homogenisierungszeit quadratisch
höhere Diffusivität verkürzt sie direkt

Deshalb ist eine hohe laterale Diffusivität für große aktive Wärmeplatten von strategischer Bedeutung.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

8.5 Praktische Relevanz

Hohe Homogenität bedeutet in realen Anwendungen:

gleichmäßigeres Bräunen
geringere Hotspots
weniger lokale Überhitzung
bessere Produktqualität
stabilere Regelung
geringere Spannungsgradienten
gleichmäßigere thermische Alterung

Damit ist Temperaturhomogenität keine kosmetische Kennzahl, sondern eine zentrale Leistungsgröße.

---

9. Vertikaler Wärmewiderstand und der häufigste Denkfehler

9.1 Der klassische Ansatz

In vielen technischen Diskussionen wird Wärmeleistung über den vertikalen Wärmewiderstand beschrieben:

$R_{th} = L / (k A)$

Für mehrere Schichten seriell:

$R_{th,total} = \Sigma(t_i / (k_i A))$

Dieser Ansatz ist formal korrekt für den Wärmedurchgang durch die Dicke. Er wird oft benutzt, um Materialien oder Schichtsysteme zu vergleichen.

9.2 Warum dieser Ansatz allein nicht genügt

Bei aktiven Wärmeplatten ist das Hauptziel jedoch häufig nicht nur, Wärme von unten nach oben durchzuleiten, sondern Wärme nach dem Eintrag über die Fläche zu homogenisieren. Der reine vertikale Widerstand sagt über diese Fähigkeit nur sehr begrenzt etwas aus.

Ein System kann vertikal einen ähnlichen Wärmewiderstand wie ein anderes haben und dennoch eine völlig andere Flächenhomogenität zeigen. Der Unterschied liegt in der lateralen Architektur.

9.3 Der architektonische Denkfehler

Der häufigste Denkfehler lautet:

Wenn zwei Systeme den gleichen vertikalen Wärmewiderstand haben, dann haben sie eine vergleichbare thermische Performance.

Diese Aussage ist für aktive Wärmeplatten im Regelfall falsch.

Denn thermische Performance umfasst mindestens:

Aufheizverhalten
Flächenhomogenität
lokale Übertemperatur
Regelbarkeit
Dynamik
Nutzbarkeit bei realer Last

All diese Größen werden entscheidend durch die laterale Wärmeverteilung beeinflusst.

9.4 Konsequenz

Der vertikale Wärmewiderstand bleibt relevant, insbesondere für Energiefluss, Aufheizpfad und Oberflächenerreichbarkeit. Er ist aber **kein hinreichendes Primärkriterium** für die Bewertung aktiver Wärmeplatten. Die Architektur muss stets in mindestens zwei Richtungen betrachtet werden:

durch die Dicke
in der Ebene

---

10. Thermische Diffusivität als dynamische Schlüsselgröße

10.1 Definition

Die thermische Diffusivität ist definiert als

$\alpha = k / (\rho c_p)$

mit

k = Wärmeleitfähigkeit
ρ = Dichte
c_p = spezifische Wärmekapazität

Sie beschreibt, wie schnell sich eine Temperaturstörung im Material räumlich ausbreitet.

10.2 Warum Diffusivität mehr ist als Leitfähigkeit

Ein Material mit hoher Leitfähigkeit kann trotzdem träge sein, wenn seine volumetrische Wärmekapazität hoch ist. Umgekehrt kann ein Material mit moderater Leitfähigkeit dynamisch durchaus günstig sein.

Für aktive Wärmeplatten ist Diffusivität relevant, weil sie die Geschwindigkeit der Temperaturnivellierung beeinflusst. Die Architektur muss deshalb nicht nur auf hohe Leitfähigkeit, sondern auf eine sinnvolle Balance zwischen Leitfähigkeit und Speicherwirkung ausgelegt werden.

10.3 Laterale effektive Diffusivität

Analog zur effektiven lateralen Leitfähigkeit lässt sich auch eine effektive laterale Diffusivität definieren. Formal ist dies komplexer, da mehrschichtige Systeme gekoppelte Energiespeicherung und Leitung besitzen. Näherungsweise kann eine architektonische Bewertungsgröße als Verhältnis aus effektiver lateraler Leitfähigkeit und effektiver volumetrischer Wärmekapazität formuliert werden.

Qualitativ gilt:

hoher hochleitfähiger Kernanteil erhöht die laterale Diffusivität
hohe Massedichte und hohe Wärmekapazität vergrößern die thermische Trägheit

Gerade hier unterscheiden sich Aluminiumkern und Kupferkern architektonisch. Kupfer erhöht Leitfähigkeit und Dichte. Aluminium ermöglicht ein anderes Verhältnis von Leitfähigkeit zu Masse.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

11. Wärmestromdichte, Temperaturgradient und Leistung

11.1 Wärmestromdichte

Die Wärmestromdichte lautet:

$q = \dot{Q} / A$

Sie beschreibt, wie viel Wärmeleistung pro Fläche durch eine Ebene übertragen wird.

In aktiven Wärmeplatten ist q nicht überall konstant. Bei lokalen Quellen, Randverlusten und ungleichmäßiger Last entstehen örtlich stark unterschiedliche Werte.

11.2 Temperaturgradient

Der Temperaturgradient ist der räumliche Temperaturabfall pro Weglänge. Eindimensional:

dT/dx

bzw. über eine Schichtdicke:

ΔT / thickness

Hohe Gradienten sind kritisch, weil sie

lokale Spannungen erzeugen
Regelung erschweren
Oberflächenqualität verschlechtern
thermische Spitzen verursachen

11.3 Zusammenhang mit Architektur

Eine gute thermische Architektur reduziert ungünstige lokale Gradienten, indem sie Wärme lateral verteilt. Das ist insbesondere für hohe Flächenleistungen relevant. Mit steigender Leistung wird nicht nur der absolute Wärmeeintrag größer, sondern auch das Risiko lokaler Temperaturspitzen.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

12. Thermisch induzierte Spannungen

12.1 Grundgleichung

Ein einfaches lineares Näherungsmodell für thermisch induzierte Spannung lautet:

$\sigma = E \alpha_{th} \Delta T$

mit

σ = Spannung
E = Elastizitätsmodul
α_{th} = thermischer Ausdehnungskoeffizient
ΔT = Temperaturänderung

12.2 Bedeutung in Multilayer Systemen

In mehrschichtigen Architekturen ist dies nur die erste Näherung. Relevant ist nicht nur die absolute Ausdehnung jeder Schicht, sondern die **Differenz der freien thermischen Dehnung** zwischen den Schichten.

Wenn zwei fest verbundene Schichten unterschiedliche thermische Ausdehnungen aufweisen, entsteht Zwang. Dieser Zwang führt zu Spannungen und gegebenenfalls zu Krümmung.

12.3 Freie thermische Dehnung

Für eine einzelne Schicht wäre die freie thermische Dehnung

$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \Delta T$

Sind zwei Schichten miteinander verbunden, können sie sich nicht frei und unabhängig ausdehnen. Die Kompatibilitätsbedingung erzeugt Spannungen.

12.4 Bedeutung der Symmetrie

Symmetrische Architekturen sind hier besonders vorteilhaft. Bei spiegelbildlichem Aufbau heben sich viele Biegeeffekte systematisch auf. Dadurch sinkt das Risiko eines globalen thermisch induzierten Verzuges.

12.5 Lokale Temperaturgradienten als Spannungsursache

Nicht nur mittlere Temperaturänderungen, sondern vor allem lokale und zeitlich veränderliche Gradienten sind kritisch. Wenn eine Zone stark erhitzt wird und angrenzende Bereiche kühler bleiben, entstehen Dehnungsunterschiede innerhalb derselben Schicht und zwischen den Schichten.

Deshalb verbessert eine hohe laterale Homogenität nicht nur die thermische Funktion, sondern auch die mechanische Stabilität.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

13. Mechanische Logik thermischer Architekturen

13.1 Wärmeplatte als thermo mechanisches Bauteil

Eine industrielle Wärmeplatte ist niemals nur thermisch belastet. Sie ist zugleich ein mechanisches Bauteil. Relevante Lasten sind:

Eigengewicht
Auflagerreaktionen
Schraubverbindungen
Einspannung
Kontaktlasten
thermische Expansion
lokale Stoßbelastung
Bearbeitungsrestspannungen
Schweißeinflüsse
Oberflächenprozesse

Die thermische Architektur muss daher immer auch mechanisch tragfähig sein.

13.2 Rolle des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul beeinflusst, wie stark ein Werkstoff auf Zwangsdehnung mit Spannung reagiert. Hochsteife Decklagen können thermische Spannungen stärker übertragen. Gleichzeitig erhöhen sie die Biegesteifigkeit.

13.3 Biegesteifigkeit

Die Biegesteifigkeit skaliert stark mit der Dicke. Daher ist nicht nur das Material, sondern die Lage des Materials in der Dicke relevant. Decklagen wirken bezüglich Biegung besonders effizient, weil ihr Abstand zur neutralen Faser groß ist.

Dies ist ein weiterer Grund, warum Skin und Kern architektonisch unterschiedlich bewertet werden müssen. Die gleiche Materialmenge erzeugt je nach Position in der Dicke unterschiedliche mechanische Wirkung.

13.4 Restspannungen

Fertigungsprozesse wie Walzen, Fügen, Schleifen, Wärmebehandlung oder Beschichtung können Restspannungen erzeugen. Diese Spannungen überlagern sich mit Betriebsspannungen. Eine gute Architektur muss daher nicht nur idealphysikalisch, sondern auch fertigungstechnisch robust sein.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

14. Werkstoffgruppen und ihre architektonische Funktion

14.1 Aluminiumkern

EN AW 1050 dient als hochleitfähige Kernoption mit relativ geringer Dichte. Architektonisch bietet Aluminium

hohe laterale Wärmeleitung
günstiges Verhältnis von Leitfähigkeit zu Masse
gute Eignung für schnelle Homogenisierung
geringere Dichte als Kupfer

Aluminium ist jedoch kein idealer Oberflächenwerkstoff für jede Anwendung. Genau daraus entsteht der Nutzen einer Verbundarchitektur.

14.2 Kupferkern

High purity copper ermöglicht eine nochmals höhere Leitfähigkeit. Daraus folgen

maximale laterale Wärmeverteilung
sehr hohe lokale Entschärfung von Hotspots
potenziell höchste Homogenität

Dem stehen gegenüber

höhere Dichte
höhere Kosten
größere Anforderungen an das Spannungs und Fügemanagement

14.3 Edelstahlskins

Edelstähle wie 304, 316L, 316Ti, 430 oder 436 bieten

geeignete prozessseitige Oberfläche
Korrosionsbeständigkeit
Festigkeit
Reinigbarkeit
hygienische Eignung
mechanische Robustheit

Architektonisch sind sie prädestiniert als Funktionshaut, auch wenn sie thermisch deutlich unter Aluminium oder Kupfer liegen.

14.4 Baustahl in Class II

S235 und S355 erfüllen vor allem strukturelle und wirtschaftliche Funktionen. Thermisch liegen sie typischerweise oberhalb vieler Edelstähle, aber deutlich unter hochleitfähigen Kernwerkstoffen. Ihre Rolle in RevoTHERM® ist nicht die Maximierung der Homogenität, sondern eine balancierte Architektur zwischen Oberfläche, Struktur und Wirtschaftlichkeit.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

15. Schichtdicke als eigenständiger Entwurfsparameter

15.1 Warum Dicke nicht nur Masse bedeutet

In vielen technischen Diskussionen wird Dicke mit Masse oder Festigkeit gleichgesetzt. In thermischen Architekturen bestimmt Schichtdicke jedoch gleichzeitig

thermischen Anteil an k_xy,eff
vertikalen Widerstand
Biegesteifigkeit
thermische Speicherkapazität
Position der neutralen Faser
Spannungsniveau
Fertigungslogik
Kosten

15.2 Skinstärken

Bei RevoCORE® und RevoDUR® sind typische Skinstärken:

1 mm
1.5 mm
2 mm
2.5 mm

Dünnere Skins erhöhen bei gleicher Gesamtdicke den Kernanteil und damit typischerweise die laterale Performance. Dickere Skins erhöhen Oberflächenrobustheit und mechanische Reserven, können jedoch den relativen Einfluss des hochleitfähigen Kerns auf k_xy,eff reduzieren.

15.3 Gesamtdicke

Die Gesamtdicke beeinflusst

Biegesteifigkeit
thermische Masse
vertikalen Weg
Leistungsdichte je Volumen
zeitliches Verhalten

Eine größere Dicke ist nicht automatisch besser. Für aktive Systeme kann eine zu große Dicke die Dynamik verschlechtern. Für mechanische Stabilität oder strukturelle Anforderungen kann sie dennoch erforderlich sein. Genau deshalb ist Dicke eine Architekturfrage und kein isolierter Zahlenwert.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

16. Oberfläche als thermische und funktionale Randbedingung

16.1 Oberfläche ist nicht nur Optik

Die Oberfläche bestimmt

Kontaktwiderstand
Reibung
Verschleiß
Reinigbarkeit
Emissionsverhalten
chemische Beständigkeit
Benetzungsverhalten
Anhaftung
thermischen Übergang zum Prozessgut

16.2 Oberflächenzustände

Typische Oberflächen können sein:

geschliffen
hartverchromt
keramisch beschichtet

Architektonisch ist entscheidend, dass Oberflächenprozesse nicht losgelöst von der Grundarchitektur bewertet werden. Jede Oberflächenmodifikation kann thermische, mechanische oder tribologische Folgen haben.

16.3 Dünne Oberflächenschichten

Eine harte oder funktionale Oberflächenschicht im Bereich von etwa 80 µm verändert die Gesamtdicke nur gering, kann aber lokal Grenzflächenverhalten, Emission, Kontakt und Verschleiß erheblich beeinflussen. Für Hochpräzisionsanwendungen ist deshalb auch die dünne Oberfläche Teil der thermischen Architektur.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

17. Induktive Erwärmung und Skin Depth

17.1 Grundlagen

Bei induktiver Erwärmung wird elektrische Energie über ein zeitlich veränderliches Magnetfeld in Wärme umgewandelt. Die Stromverteilung im Leiter ist frequenzabhängig. Die charakteristische Eindringtiefe ist die Skin Depth:

$\delta = \sqrt{(2\rho / (\omega \mu))}$

mit

δ = Skin Depth
ρ = elektrischer Widerstand
$\omega = 2\pi f$
μ = magnetische Permeabilität

17.2 Bedeutung für thermische Architekturen

Die induktive Eignung einer mehrschichtigen Platte hängt nicht nur vom sichtbaren Oberflächenmaterial ab, sondern von der elektromagnetischen und thermischen Kopplung der Architektur. Relevante Fragen sind:

In welcher Schicht wird primär Leistung eingetragen
wie verteilt sich die eingebrachte Wärme danach
wie schnell nivellieren lokale Heizfelder
welche Schicht beeinflusst das Feld
wie interagieren Frequenz und Schichtdicke

17.3 Architektur statt Einzelkennwert

Auch hier zeigt sich die Stärke des Architekturansatzes. Eine induktiv beheizte Platte darf nicht nur nach der Skin Depth des Oberflächenwerkstoffs bewertet werden. Entscheidend ist, wie die eingetragene Wärme im Gesamtsystem weitergeführt wird.

---

18. Thermische Masse, Energiebedarf und Aufheizzeit

18.1 Grundenergie

Die notwendige Energie zum Erwärmen einer Platte lautet näherungsweise:

$$Q = m c_p \Delta T$$

mit

Q = Wärmemenge
m = Masse
c_p = spezifische Wärmekapazität
ΔT = Temperaturänderung

Für mehrschichtige Systeme gilt:

$$Q = \Sigma(m_i c_{p,i} \Delta T)$$

oder mit Volumen und Dichte

$$Q = \Sigma(\rho_i V_i c_{p,i} \Delta T)$$

18.2 Aufheizzeit

Bei idealisierter konstanter Leistung P ergibt sich ohne Verluste:

$$t_{heat} = Q / P$$

Real gilt:

$$t_{heat} > Q / P$$

weil Verluste, Inhomogenitäten und Regelvorgänge auftreten.

18.3 Zusammenhang mit Architektur

Eine gute Architektur reduziert nicht zwingend die Gesamtenergie, wohl aber häufig

die lokale Übertemperatur
die notwendige Sicherheitsreserve
die Ausgleichszeit bis zur Flächenhomogenität
den Bedarf an Überheizung einzelner Zonen

Dadurch kann die reale Nutzbarkeit erheblich besser sein als bei architektonisch schwachen Systemen.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

19. Leitfähigkeitsdichte und geometrische Effizienz

19.1 Motivation

Für Plattenarchitekturen ist nicht nur der absolute Wert der lateralen Leitfähigkeit relevant, sondern auch dessen Verhältnis zur Dicke.

Eine sinnvolle Bewertungsgröße ist daher die **Leitfähigkeitsdichte**:

Leitfähigkeitsdichte = k_xy,eff / L_total

mit

L_total = Gesamtdicke

19.2 Aussagekraft

Diese Größe bewertet, wie viel laterale Leitfähigkeit pro Dickeneinheit in der Architektur realisiert wird. Sie ist besonders interessant, wenn Bauraum, Masse oder Kompaktheit begrenzt sind.

19.3 Technische Relevanz

Architekturen mit hoher Leitfähigkeitsdichte sind geometrisch effizient. Das ist insbesondere bei kompakten Heizsystemen, schnellen Regelkreisen und gewichtssensitiven Anwendungen von Bedeutung.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

20. Warum Architektur größer ist als Materialmenge

Ein häufiger Fehlschluss lautet, dass mehr Metall oder mehr Dicke automatisch bessere thermische Performance bedeutet. Tatsächlich kann eine gezielte Architektur mit funktionaler Schichtverteilung deutlich überlegen sein gegenüber einem massiveren, aber architektonisch unstrukturierten Monolithen.

Der Grund ist einfach:

Nicht die bloße Materialmenge entscheidet über die Funktion, sondern
die Verteilung der Materialeigenschaften im Raum.

Eine dünnere, hocharchitektonische Platte kann daher in einer realen Anwendung funktional überlegen sein gegenüber einer dickeren, monolithischen Platte, wenn sie Wärme schneller lateral verteilt, geringere Hotspots erzeugt und effizienter regelbar ist.

---

21. Thermische Architektur als Entwicklungslogik

Die Thermal Architecture Methodologie ist keine reine Klassifikation, sondern eine Entwicklungslogik. Sie ermöglicht, Wärmeplatten systematisch aus dem Lastfall heraus zu entwerfen.

Der Entwicklungsweg lautet vereinfacht:

1
Definition des thermischen Lastfalls

2
Definition der Flächenanforderung und Homogenität

3
Definition mechanischer und oberflächenseitiger Anforderungen

4
Auswahl geeigneter Architekturklasse

5
Dimensionierung von Skin, Kern und Gesamtdicke

6
Prüfung von $k_{xy,eff}$, $k_{z,eff}$, α_{xy}, Masse, Energiebedarf und Spannungsniveau

7
Abgleich mit Fertigung, Kosten und Lebensdauer

Damit wird aus einer oft intuitiven Materialentscheidung ein belastbarer Engineering Prozess.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

22. Einordnung der Revolit Architekturklassen

22.1 RevoTHERM®

RevoTHERM® ist relevant, wenn eine zweischichtige Balance aus Oberfläche und Struktur wirtschaftlich und funktional sinnvoll ist. Die Klasse zeigt, dass bereits mit zwei Schichten eine funktionale Entkopplung zwischen Oberfläche und Träger möglich wird.

22.2 RevoCORE®

RevoCORE® ist die zentrale Class III Architektur für aktive Wärmeplatten mit hoher lateraler Wärmeverteilung bei gleichzeitig funktionaler Edelstahloberfläche. Diese Architektur adressiert direkt den Zielkonflikt zwischen Oberflächenfunktion und thermischer Verteilungsleistung.

22.3 RevoDUR®

RevoDUR® erweitert die Logik in Richtung maximaler Leistungsfähigkeit. Die Klasse ist dort relevant, wo extreme Homogenität, schnelle laterale Diffusion oder besondere Hochleistungsanforderungen dominieren.

22.4 RevoLAB®

RevoLAB® markiert den Übergang von der klassischen Kern Skin Architektur zur komplexen Multilayer Funktionsarchitektur. Diese Klasse ist strategisch besonders wichtig, weil sie zukünftige Generationen thermischer Systeme abbildet, bei denen mehrere Funktionen schichtweise integriert werden.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

23. Technische Bedeutung für OEM und Entwicklungsabteilungen

Für OEM Kunden und technische Entwicklungsabteilungen bietet der Architekturansatz mehrere Vorteile.

Erstens entsteht ein konsistenter Bezugsrahmen für die Bewertung unterschiedlicher Konzepte.

Zweitens können Zielkonflikte explizit gemacht werden, statt sie durch grobe Materialentscheidungen zu verdecken.

Drittens wird die Kommunikation zwischen Konstruktion, Thermik, Fertigung, Einkauf und Qualitätswesen verbessert, weil Architektur eine gemeinsame Sprache bereitstellt.

Viertens ermöglicht die Methodologie eine skalierbare Plattformlogik. Eine einmal definierte Architektur kann auf verschiedene Größen, Dicken und Oberflächen adaptiert werden, ohne die Grundlogik zu verlieren.

---

24. Grenzen und notwendige Vertiefungen

Dieses Whitepaper legt den Rahmen. Es beansprucht nicht, jede reale Anwendung vollständig abzubilden. Folgende Aspekte müssen in weiterführenden Whitepapers und Engineering Tools vertieft werden:

temperaturabhängige Materialkennwerte
reale Grenzflächenwiderstände
Kontaktwiderstände zum Prozessgut
instationäre Lastfälle
Randverluste durch Konvektion und Strahlung
nichtlineare Regelvorgänge
detaillierte Spannungsmodelle
zyklische Ermüdung
induktive Kopplung in realen Geometrien
Fertigungseinflüsse und Toleranzketten

Gerade deshalb ist dieses Whitepaper als Framework aufgebaut. Es schafft die Sprache, die Ordnung und die physikalische Logik, auf der weitere Detaildokumente aufbauen.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

25. Schlussfolgerung

Die traditionelle Betrachtung industrieller Wärmeplatten über Einzelwerkstoffe, Dickenangaben und einfache Leitfähigkeitswerte ist für moderne aktive thermische Systeme nicht mehr ausreichend. Eine Wärmeplatte ist nicht bloß eine Platte aus Metall, sondern ein funktionales, gekoppeltes thermo mechanisches System.

Der geeignete Bezugsrahmen dafür ist die **thermische Architektur**.

Thermische Architektur bedeutet, dass Leistung nicht primär durch den Werkstoff als solchen, sondern durch die **räumliche Anordnung und funktionale Verteilung thermischer Eigenschaften** entsteht. In diesem Rahmen sind mehrschichtige Metallverbunde keine Sonderlösung, sondern die logische Antwort auf mehrdimensionale technische Anforderungen.

Die Einführung der fünf Architekturklassen schafft eine Systematik, mit der sich monolithische und mehrschichtige Lösungen einordnen, vergleichen und auslegen lassen. Class 0 und Class I markieren monolithische Referenzen. RevoTHERM® zeigt die erste funktionale Entkopplung in Class II. RevoCORE® und RevoDUR® demonstrieren die Leistungsfähigkeit symmetrischer Dreischichtsysteme. RevoLAB® öffnet den Raum für komplexe Multimehrschichtarchitekturen mit mehreren integrierten Funktionen.

Physikalisch wird klar, dass aktive Wärmeplatten nicht nur über vertikale Wärmeleitung verstanden werden dürfen. Ihre reale Performance wird in hohem Maß von lateraler Wärmeleitfähigkeit, lateraler Diffusivität, Temperaturhomogenisierung und architektonischer Symmetrie bestimmt. Der vertikale Wärmewiderstand bleibt relevant, ist aber kein ausreichendes Primärkriterium. Entscheidend ist das Zusammenwirken von Leitung, Speicherung, Verteilung, Oberfläche und Struktur.

Damit etabliert dieses Whitepaper eine fundamentale Perspektive:

Aktive Wärmeplatten sind keine Materialfrage.
Sie sind eine Architekturfrage.

Diese Sicht ist nicht nur theoretisch konsistent, sondern industriell hoch relevant. Sie schafft die Grundlage für eine neue Entwicklungslogik, für belastbare Whitepapers, für digitale Engineering Tools und für eine technologische Positionierung, in der Architektur und nicht bloße Materialmenge zum dominanten Entwurfsprinzip wird.

---

26. Formelanhang

Nachfolgend die zentralen Gleichungen des Frameworks in kompakter Form.

26.1 Fouriersches Gesetz

$q = -k \nabla T$

26.2 Eindimensionale Wärmeleitung

$q = -k \, dT/dx$

26.3 Wärmestrom

$\dot{Q} = -k A \, dT/dx$

26.4 Instationäre Wärmeleitung

$\rho \, c_p \, \partial T/\partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}_v$

26.5 Diffusivität

$\alpha = k / (\rho \, c_p)$

26.6 Effektive laterale Wärmeleitfähigkeit

$k_{xy,eff} = \Sigma(k_i \, t_i) / \Sigma(t_i)$

26.7 Effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit

$k_{z,eff} = L_{total} / \Sigma(t_i / k_i)$

26.8 Thermischer Widerstand einer Schicht

$R_{th} = L / (k A)$

26.9 Gesamter serieller Widerstand

$R_{th,total} = \Sigma(t_i / (k_i A))$

26.10 Freie thermische Dehnung

$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \Delta T$

26.11 Thermisch induzierte Spannung

$\sigma = E \, \alpha_{th} \Delta T$

26.12 Wärmeenergie

$Q = m \, c_p \Delta T$

26.13 Wärmeenergie für Multilayer

$Q = \Sigma(m_i \, c_{p,i} \Delta T)$

26.14 Idealisierte Aufheizzeit

$t_{heat} = Q / P$

26.15 Skin Depth

$\delta = \sqrt{(2\rho / (\omega \mu))}$

26.16 Kreisfrequenz

$\omega = 2\pi f$

26.17 Charakteristische Homogenisierungszeit

$\tau \sim L^2 / \alpha_{xy}$

26.18 Leitfähigkeitsdichte

Leitfähigkeitsdichte = $k_{xy,eff} / L_{total}$

---

27. Begriffsdefinitionen

Thermische Architektur
Gezielte funktionale Verteilung von Werkstoffen und Schichten innerhalb einer Wärmeplatte zur Erzeugung definierter thermischer und mechanischer Systemeigenschaften.

Laterale Wärmeleitfähigkeit
Effektive Fähigkeit einer Architektur, Wärme in der Plattenebene zu verteilen.

Vertikale Wärmeleitfähigkeit
Effektive Fähigkeit einer Architektur, Wärme durch die Dicke zu übertragen.

Thermische Diffusivität
Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich Temperaturänderungen räumlich ausbreiten.

Symmetrische Architektur
Schichtaufbau mit spiegelbildlich gleicher oder äquivalenter Struktur oberhalb und unterhalb der Mittellage.

Skin
Deckschicht einer Architektur, die primär Oberflächenfunktion und oft mechanische Randfunktion übernimmt.

Core
Kernschicht einer Architektur, die häufig die thermische Hauptfunktion der lateralen Verteilung übernimmt.

Homogenität
Grad der Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung über die aktive Oberfläche.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland

28. Executive Summary für Management und CTO

Dieses Whitepaper zeigt, dass aktive Wärmeplatten nicht sinnvoll über den Werkstoff allein beschrieben werden können. Ihre Performance wird durch thermische Architektur bestimmt. Entscheidend sind die räumliche Verteilung von Leitfähigkeit, die thermische Diffusivität, die Schichtsymmetrie und die funktionale Trennung von Oberfläche und Kern.

Die Klassifikation in Class 0 bis Class V schafft einen systematischen Rahmen. RevoTHERM® steht für zweischichtige Funktionsentkopplung. RevoCORE® beschreibt eine symmetrische Dreischichtarchitektur mit Edelstahlskins und Aluminiumkern. RevoDUR® erweitert dies mit Kupferkern. RevoLAB® definiert komplexe Multimehrschichtarchitekturen.

Für aktive Wärmeplatten ist insbesondere die laterale Wärmeverteilung entscheidend. Sie beeinflusst Homogenität, Aufheizverhalten, Regelbarkeit und Verzug. Der rein vertikale Wärmewiderstand ist dafür kein ausreichendes Bewertungskriterium. Die architektonische Perspektive ermöglicht damit eine präzisere Entwicklung, bessere Vergleichbarkeit und eine neue technologische Sprache für OEM Anwendungen.

© 2026 Revolit GmbH – Switzerland