

Flüssigkeitskühlung und die zwingende Notwendigkeit chemischer Kompatibilität

Kühlmittel und Komponentenwerkstoffe – sowie deren Wechselwirkungen

Von

Elizabeth Langer, Engineering Manager, Thermal Management, CPC

Koray Sekeroglu, PhD, Senior Research Engineer, Thermal Management, CPC

Die Leistungsstärke in elektronischen Systemen steigt weiter an, womit auch die Nachfrage nach extremer Kühlleistung – einer, die Flüssigkeitskühlung zwingend erfordert – zunimmt. Jetzt untersuchen Systementwickler und Anwender von Flüssigkühlung mehr denn je innovative Werkstoffkombinationen, wie z. B. moderne Kunststoffe, spezielle Elastomere, Metalllegierungen und technisch relevante Flüssigkeiten, um Effizienz, Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit des Thermal Managements zu optimieren.

Ganz gleich, ob es sich um den Entwurf eines geschlossenen Kühlsystems, eines Ein- oder Zweiphasen-Immersionssystems oder eines Direct-to-Chip-Kühlsystems handelt, die Kompatibilität von Komponentenwerkstoffen ist für die Leistung entscheidend. Dieser technische Leitfaden enthält allgemeine Hinweise für die Auswahl der richtigen Zusammensetzung Ihrer Flüssigkühlung.

BEI DER AUSWAHL VON KOMPONENTEN SOLLTE IMMER EIN GANZHEITLICHER DENKANSAZT VORRANG HABEN.

Eine Vielzahl von Subsystemen und Komponenten bildet das Grundgerüst, das für den erfolgreichen und zuverlässigen Betrieb jedes Kühlsystems entscheidend ist.

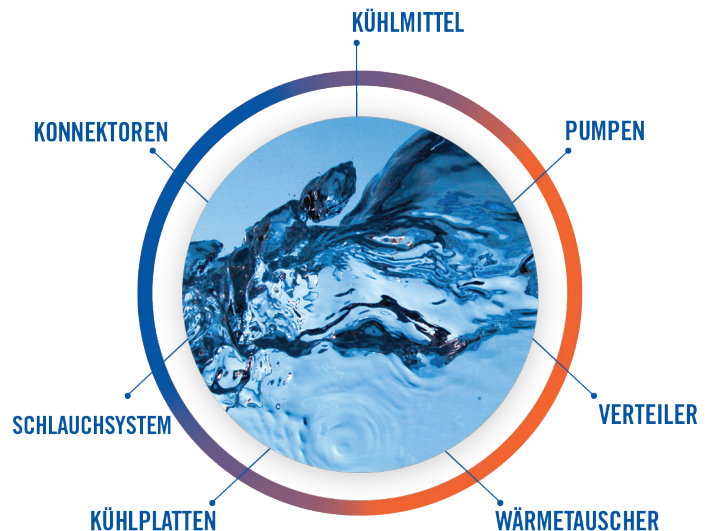
Jede Systemkomponente hat das Potenzial mit anderen Komponentenwerkstoffen zu reagieren. Daher erfordern die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Werkstoffen während der Entwicklung und Spezifikation eine detaillierte Analyse.

Kühlmittel sind von besonderem Interesse, nicht nur als primäres System der Wärmeübertragung, sondern weil sie in Kontakt mit allen medienberührenden Werkstoffen innerhalb eines bestimmten Kühlsystems kommen und im Wesentlichen alle Komponenten „verbinden“. Einige Flüssigkeiten können bei Kontakt mit bestimmten Werkstoffen Korrosion oder Biofouling begünstigen, was zu einer Beeinträchtigung

oder zu einem Ausfall des Kühlsystems führen kann. Daher ist es wichtig zu verstehen, um welche Werkstoffe es sich handelt und welche Wechselwirkungen sie haben könnten. Insbesondere bei der Beurteilung der chemischen Kompatibilität und der potenziellen Permeations- oder Diffusionsverluste müssen kritische Verbindungspunkte – wie z. B. Schlauchverbindungen, Verteileranschlüsse und Schnellkupplungen – identifiziert und auf Zuverlässigkeits- und Leistungsrisiken hin untersucht werden.

Insgesamt sollten Sie bei der Materialauswahl ganzheitlich denken. Berücksichtigen Sie alle Systemkomponenten und mögliche Auswirkungen der Arbeitsumgebung, der Betriebstemperatur und des -drucks, des Mediums und der mechanischen Belastung, die sich negativ auf die Leistung auswirken können.

In diesem Leitfaden werden Kühlmittel erwähnt, die häufig in Flüssigkeitskühlungsanwendungen eingesetzt werden; zudem erhalten Sie einen Überblick über die Konstruktionswerkstoffe. Abschließend werden wir Ihnen Hinweise zur potenziellen Kompatibilität dieser Flüssigkeiten und Materialien geben, wenn diese zusammen verwendet werden.



Jede Komponente in einem Flüssigkeitskühlungssystem hat das Potenzial, mit anderen Komponentenwerkstoffen über den medienberührenden Kreis zusammenzuwirken.

ERSCHLIESSEN VON KÜHLMITTELALTERNATIVEN

Offensichtlich steht die Auswahl eines Kühlmittels beim Entwurf eines Flüssigkeitskühlsystems im Fokus. Aus Kompatibilitätsgründen ist es wichtig zu erkennen, dass die Flüssigkeit praktisch jede Komponente verbindet, während sie durch das Flüssigkeitskühlsystem zirkuliert. Mit der Tabelle erhalten Sie einen kurzen Überblick über eine Reihe von Flüssigkeiten, die typischerweise zur Kühlung von Elektronik verwendet werden.

Sehen Sie sich zunächst die Betriebs- und Lagertemperaturen an. Bestimmen Sie Flüssigkeiten, die mit ihren Eigenschaften für Ihre Anwendungsumgebung geeignet sind, ob z. B. auch ihr Siedepunkt die erforderliche thermische Belastung und Wärmeeffizienz erfüllt, ohne den kritischen Wärmefluss zu überschreiten. Prüfen Sie während Lagerung und Transport die Niedrigtemperatureigenschaften, wie auch die Umwelteinflüsse, insbesondere mit technisch ausgereiften Dielektrika wie Fluorchemikalien sowie Kältemitteln. Es ist oftmals notwendig, die Umweltauswirkungen der Flüssigkeit während des gesamten Lebenszyklus zu verstehen, so z. B. wie sie hergestellt wird und wie ihre möglichen Auswirkungen während des Betriebs sind. Dazu gehört auch das Eindringen in die Anlage oder Atmosphäre und die Berücksichtigung der Anforderungen an die Rückgewinnung von Flüssigkeiten am Ende ihres Lebenszyklus.

Berücksichtigen Sie bei der Auswahl von Flüssigkeiten das Ozonabbau- und das Erderwärmungspotenzial, insbesondere in Bezug auf Kältemittel und Dielektrika. In den letzten zehn Jahren haben die Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation die Bedeutung dieser Parameter verstärkt, was die Entwicklung von umweltfreundlicheren Alternativen, wie 3M Novec™, HFE-Kühlmitteln oder Hydrofluorolefin-Kältemitteln der vierten Generation, wie R-1234 oder R-1336 zur Folge hat.

Neben der thermischen Stabilität und chemischen Kompatibilität sollte man auch die Toxizität, die Entflammbarkeit und die Reinheitsanforderungen des Kühlmittels, die Umweltbelastung und auch die Kosten berücksichtigen. Und natürlich sollten Sie beim Vergleich der Kühlmitteltypen und -optionen alle Werkstoffe berücksichtigen, mit denen die Flüssigkeit im gesamten System in Kontakt kommen kann.

GRÖSSENBESTIMMUNG VON KONSTRUKTIONSMATERIALIEN

Elektronik-Kühlsystemkomponenten bestehen im Allgemeinen aus drei Arten von Polymeren – Standardkunststoffen, technischen Kunststoffen und Elastomeren – und vier Arten von Metalllegierungen – Aluminium, Messing, Kupfer und Edelstahl. Die Tabellen (rechts und Seite 3) bieten einen umfassenden Vergleich der Komponentenwerkstoffe eines Flüssigkeitskühlsystems.

Polymerstärken

Die Polymereigenschaften - angefangen bei Standardkunststoffen bis hin zu hochleistungsfähigen Thermoplasten und Elastomeren - können je nach Verarbeitung, Additiven, Füllstoffen und ihrer Anordnung im Kühlprozess stark variieren.

Polymere können Metall in vielen Bereichen ersetzen und bieten oft zusätzliche Vorteile. Beispielsweise können technische Kunststoffe, wie PPSU und PEEK im Vergleich zu

KÜHLMITTEL <i>Flüssigkeiten, die häufig in der Elektronik Kühlung verwendet werden</i>	
Wasser	Ausgezeichnete Wärmeübertragung, niedrige Viskosität, nicht entflammbar und preisgünstig. Relativ eingeschränkter Betriebsbereich; problematisch nahe dem Gefrier- oder Siedepunkt. Empfindlich für biologisches Fouling (Belagsbildung), das die Wärmeübertragung hemmt. Kann Verunreinigungen und einhergehende Korrosion bedeuten; die Entionisierung kann anfänglich reduziert werden, obwohl Verunreinigungen im Laufe der Zeit durch medienberührende Oberflächen entstehen können.
Ethylen-glykol (EG)	Kontrolliert biologisches Wachstum, senkt den Gefrierpunkt und erhöht den Siedepunkt bei Verwendung mit Wasser, bei einer Konzentration von 10 % bis 90 % EG. Preisgünstiger als Kühlmittel oder Dielektrika. Wasser kann dennoch Korrosion fördern und das Kühlmittel im Laufe der Zeit zersetzen. Sehr giftig, erfordert sorgfältige Handhabung.
Propylenglykol (PG)	Kontrolliert biologisches Wachstum bei Verwendung mit Wasser, bei einer Konzentration von 10 % bis 90 % PG. Preisgünstiger als Kühlmittel oder Dielektrika. Geringere Wärmeleitfähigkeit und höhere Viskosität als EG. Wasser kann dennoch Korrosion fördern und das Kühlmittel im Laufe der Zeit zersetzen. Geringe Toxizität ermöglicht einfachere Handhabung und Entsorgung.
Mineralöl	Geruchlos, nicht toxisch und chemisch träge. Kein Verdampfen, keine Volatilität. Ermöglicht Tauchanwendungen. Mögliche Unverträglichkeit mit Kupfer oder einigen Elastomeren.
Kühlmittel	Leicht und mit ausgezeichneten Wärmeleiteigenschaften. Unverträglich mit einigen Kunststoffen und Elastomeren. Teurer als Wasser, EG, PG oder Mineralöl. Beispiele sind R-1234yf und R-1336.
Dielektrika	Nicht leitende, technische Flüssigkeiten, die ein vollständiges Eintauchen der Elektronik in einphasige, zweiphasige und Direct-to-Chip-Anwendungen ermöglichen. Niedrige Siedepunkte. Hohe chemische Stabilität. Teurer. Mögliche Unverträglichkeit mit Thermoplasten oder stark plastifizierten Elastomeren.

Metallen höhere thermische, chemische und mechanische Anforderungen erfüllen und gleichzeitig zusätzliche Vorteile eines geringeren Gewichts und einer besseren Korrosionsbeständigkeit bei potenziell niedrigen Kosten bieten.

Technische Kunststoffe können eine ausgezeichnete Wahl sein, besonders wenn man die Auswirkungen von Gewicht, chemischer Kompatibilität und Preis mit ähnlichen Metallvarianten vergleicht. Bei der Spezifizierung von thermoplastischen Materialien ist auf mechanische Festigkeit, chemische Kompatibilität und thermische Stabilität zu achten.



Polymereinschränkungen

Polymere, insbesondere handelsübliche Kunststoffe und einige Thermoplaste, können in bestimmten Anwendungen Probleme verursachen.

Angesichts der zunehmenden Verbreitung von Warmwasserkühlsystemen ist die Hydrolysebeständigkeit von Polymeren zu einem wichtigen Faktor geworden. Polymere mit hydrolysierbaren Verbindungen können in Warmwasserumgebungen stark abbauen. Das gleiche Risiko kann für Fluorchemikalien bei Kontakt mit fluorierten Polymeren gelten. Wie wir wissen, wird Gleiches durch Gleiches aufgelöst; so könnte die Gefahr bestehen, dass sich bestimmte Weichmacher oder Additive in der Kühlflüssigkeit auflösen.

Die Entflammbarkeit kann bei einigen Polymeren auch ein Problem darstellen. Achten Sie auf inhärent nicht entflammbare Materialien, insbesondere auch auf nicht halogenisierte Thermoplaste. Eine Langzeitbelastung in einem breiten Temperaturbereich ist sicherlich ein wichtiger Aspekt bei der Materialauswahl für Kühlsysteme.

Weitere Risiken im Zusammenhang mit Kunststoffen sind chemische Einflüsse und Haarrisse, Rissbildungen, Verfärbungen und, wie bereits erwähnt, das Eindringen in das Kühlmittel. Flüssigkeitsabsorption, das Quellen von Stoffen und natürlich thermische Alterungs- und Abbaueffekte, die im Laufe der Zeit auftreten sowie mechanische Belastungen und Spannungen durch Druck stellen ebenfalls potenzielle Bedrohungen für die Funktionstüchtigkeit dar.

Elastomere

Elastomere können so konstruiert werden, dass sie ein breites Spektrum an Leistungsanforderungen erfüllen.

Elastomere sind Polymere, die die Eigenschaft der Viskoelastizität aufweisen – sie sind gummiartig und flexibel – und werden hauptsächlich für den Flüssigkeitstransport verwendet, so bei Komponenten wie Rohren und Schläuchen und bei

KONSTRUKTIONSWERKSTOFFE

Gängige Materialien in der Elektronik Kühlung

POLYMERE

Handelsübliche Kunststoffe	Dazu gehören HDPE, POM, PP, PS, PVC. Relativ kostengünstig und schnell lieferbar. Mögliche Entflammbarkeit bei Hochtemperaturanwendung. Mögliche thermische Zersetzung und Schwund in einigen Systemumgebungen.
Technische Thermoplaste	Wie PEEK, PEI, PESU, PPSU, PSU. Verbesserte mechanische und thermische Eigenschaften. Teurer als handelsüblicher Kunststoff.
Elastomere	Dazu gehören CR, EPDM/EPM, FKM, HNBR, Silikon. Können modifiziert werden, um Flammenschutz, Haltbarkeit oder chemische Beständigkeit zu verbessern. Manche Arten können während thermischer Zyklen oder in Kontakt mit bestimmten Lösungsmitteln die Kühlleistung negativ beeinflussen.

METALLLEGIERUNGEN

Aluminium	Strapazierfähiges, leichtes Metall. Starke thermische Eigenschaften. Mögliche galvanische Korrosion, insbesondere bei Verwendung von wasserbasierten Kühlmitteln und mit Kupfer. Die Eloxierung erhöht die Korrosionsbeständigkeit.
Messing	Langlebig. Starke thermische Eigenschaften. Relativ niedrige Kosten. Für eine bessere Korrosionsbeständigkeit oft mit Nickel und/oder Chrom beschichtet.
Kupfer	Langlebig. Starke thermische Eigenschaften. Mögliche galvanische Korrosion, insbesondere bei Verwendung von wasserbasierten Kühlmitteln und mit Aluminium.
Edelstahl	Höchste Haltbarkeit und Stabilität. Geringere Wärmeleitfähigkeit. Teurer. Passivierung der Oberfläche erhöht die Korrosionsbeständigkeit.

Dichtungskomponenten wie O-Ringen und Dichtungen. Um zu verstehen, wie sich Elastomere tendenziell verhalten, können wir uns ansehen, wie sie hergestellt werden.

Die Vulkanisierung oder der Aushärtungsprozess erzeugt permanente Querverbindungen in langen Polymerketten von Elastomeren. Diese Ketten stellen sicher, dass bei Be- und Entlastung die Elastomerkomponente in ihre ursprüngliche Position zurückkehrt. So wird ein Elastomer beispielweise als O-Ring in einer Schnellkupplung weiterhin dicht bleiben.

Auf höchster Sicherheitsstufe erfordert die Spezifikation von Elastomeren für die Verwendung in Flüssigkeitskühlungsanwendungen eine detaillierte Analyse und Bewertung des ausgewählten Kühlmittels, um Verträglichkeit und langfristige Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Für Diskussionszwecke können einige gängige Materialkombinationen, die in diesen Anwendungen auftreten können, als hydriertes Nitril, Ethylen-Propylen oder EPDM und Chloropren identifiziert werden. HNBR hat eine hervorragende chemische Beständigkeit, ausgezeichnete mechanische Eigenschaften, einschließlich Zugfestigkeit für einen breiten Temperaturbereich und kann für ausgezeichnete Beständigkeit für Hochdruckanwendungen hergestellt werden. EPDM weist ausgezeichnete Heißwasser- und Dampfbeständigkeit auf. Es ist jedoch weniger widerstandsfähig gegen Kohlenwasserstoffe; daher ist es nicht wirklich gut für jede Kältemittelanwendung geeignet.

Chloropren - allgemein als Neopren bekannt - ist sehr beständig gegen viele Chlorfluorkohlenwasserstoffe (FCKW), die als Kühlmittel verwendet werden. Es ist kostengünstig, weist jedoch moderate chemische Beständigkeit und begrenzte Temperaturbeständigkeit auf.

Einige zusätzliche Punkte, die man bei der Spezifizierung von Elastomeren beachten muss, sind die Härte (das Durometer), der Wärmewiderstand oder die Robustheit, sowohl Dauerbelastung als auch bei periodischem Einsatz. Natürlich muss auch die Zusammensetzung berücksichtigt werden, da sie direkt mit der chemischen Kompatibilität zusammenhängt.



Metalllegierungen

Im Vergleich zu handelsüblichen Kunststoffpolymeren sind Metallkomponenten in Flüssigkeitskühlungsanlagen im Allgemeinen stabiler, langlebiger und gelten als längerfristig

zuverlässig. Metallkomponenten sind in der Regel schwerer und u.U. auch teurer. Bei vielen Anwendungen rechtfertigen die verbesserten Leistungsmerkmale von Metallen die höheren Ausgaben. Bei anderen kann das richtige Polymer tatsächlich die beste Lösung bieten.

Wenn Sie Metalllegierungen für den System Einsatz in Betracht ziehen, berücksichtigen Sie die mechanische Festigkeit, Oberflächenbehandlung und Sauberkeit. Obwohl viele Kühlmittel und technische Flüssigkeiten wenig bis gar nicht korrosiv gegenüber Metallen sind, müssen Konstrukteure dennoch das Korrosionsverhalten im betrieblichen Umfeld berücksichtigen.

ALLES IN ALLEM KONZENTRIERT SICH ALLES AUF DIE CHEMISCHE KOMPATIBILITÄT

Mit einem grundlegenden Verständnis der Flüssigkeiten, Kunststoffe und Metalle, die in einer bestimmten Flüssigkeitskühlung angewendet werden, kann die chemische Kompatibilität von Systemkomponenten auf der Grundlage ihrer Zusammensetzung bewertet werden, um einen zuverlässigen, langfristigen Betrieb zu gewährleisten.

Während Polymere und Metalle in jeder beliebigen Kombination wirksam sein können, ist es wichtig, medienberührende Konstruktionswerkstoffe von Strukturwerkstoffen zu unterscheiden. Zu medienberührenden Werkstoffen gehören alle Komponenten, die direkt mit dem Kühlmittel in Berührung und daher möglicherweise auch indirekt miteinander in Kontakt kommen. Im Gegensatz hierzu kommen Strukturwerkstoffe im Normalfall nicht mit dem Kühlmittel in Kontakt. Die frühe Erstellung einer Liste mit medienberührenden Werkstoffen und Strukturwerkstoffen kann künftige Komplikationen vermeiden.

Eine vorgegebene Komponente kann möglicherweise aus einer Kombination von Polymeren und Metallen bestehen. Daher ist es wichtig, innerhalb einer bestimmten Komponente die medienberührenden Werkstoffe von Strukturwerkstoffen zu unterscheiden. Eine Schnellkupplung, wie sie links abgebildet ist, kann beispielsweise aus vernickeltem Messing hergestellt sein und eine O-Ring-Dichtung aus Elastomer, eine Daumenverriegelung aus Polysulfon und Edelstahlfedern aufweisen. Jedoch würden in einem geschlossenen Kühlsystem nur die Innenfläche des Anschlusses und die Elastomerdichtung in Kontakt mit dem Medium kommen, so dass hier nur die Kompatibilität des Kühlmittels mit diesen Materialien berücksichtigt werden muss.

In einer hohen Konzentration können Flüssigkeiten Polymere auf zwei verschiedene Arten beeinträchtigen: physikalisch oder chemisch. Die erste ist im Allgemeinen reversibel, die zweite nicht. So kann ein O-Ring-Material in einer Schnellverschlusskupplung auf ein bestimmtes Kühlmittel reagieren und dazu führen, dass der O-Ring quillt und Probleme beim Verbinden und Trennen auftreten, was möglicherweise zu Leckagen führen kann. Die Spezifizierung eines alternativen Elastomers oder der Einsatz einer anderen Flüssigkeit könnten das Problem beheben.

Bei einer chemischen Wechselwirkung, bei der jedoch ein Weichmacher aus einer Komponente, wie einem Rohr extrahiert wird, kann sich dieser gelöste Weichmacher

dramatisch auf die Leistung der Flüssigkeit auswirken und irreversibel sein. Dies kann ein kritischer Punkt bei empfindlichen, hochwertigen Anwendungen sein.

Allgemeine Anleitungen können einen guten Ausgangspunkt darstellen. Die Tabelle unten bietet einen Überblick über die relative Verträglichkeit von unterschiedlichen Werkstoff- und Kühlmitteloptionen. Denken Sie daran, dass eine ganzheitliche Berücksichtigung der vollständigen Anwendungsdetails die beste Möglichkeit ist, um sicherzustellen, dass die richtigen Materialien spezifiziert werden. Es obliegt den Systementwicklern, Komponenten

unter den zu erwartenden Betriebsextremen für ihre Anwendungen zu testen, um die Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeiten und Materialien bei anwendungsspezifischen Temperaturen, Drücken und anderen Umgebungsbedingungen zu bewerten.

Setzen Sie sich frühzeitig mit Komponentenlieferanten in Verbindung. Bestimmen Sie alle Materialien, die in Kontakt mit Kühlmitteln kommen könnten und alle anderen Variablen, die vorhanden sein könnten. Wahrscheinlich können sie hilfreiche Informationen liefern oder sogar eine für Ihre Anforderungen optimierte Lösung entwickeln.

Material- und Kühlmittelkompatibilität

Wenn medienberührende Komponenten in einem Flüssigkeitskühlsystem berücksichtigt werden, ergeben sich folgende Kombinationen:

- **A = Empfohlen** - Geringes oder kein Risiko einer chemischen Reaktion.
- **B = Gute Wahl** - Geringfügiges Risiko einer chemischen Reaktion oder Korrosion, mit begrenzten Auswirkungen auf die Systemleistung.
- **F = Nicht empfohlen** - Leichte bis schwere chemische oder korrosive Reaktionen sind wahrscheinlich. Systemleistung kann beeinträchtigt werden.

		WASSER	ETHYLENGLYKOL	PROPYLENGLYKOL	MINERALÖL	KÜHLFLÜSSIGKEITEN	DIELEKTRIKA
POLYMERE	Handelsüblicher Kunststoff	A	A	B	A	F	B
	Technische Thermoplaste	A	A	B	A	A bis F ¹	B
	Elastomere	A	A	A	A ²	A bis F ³	A bis F ³
METALLE	Aluminium	B	A	B	A	A	A
	Messing (beschichtet)	A	A	B	A	A	A
	Kupfer	B	B	A	B	A	A
	Edelstahl	A	B	B	A	A	A

¹Thermoplaste können so entwickelt werden, dass sie die Kompatibilität mit spezifischen Kühlmitteln verbessern.

²Die meisten Elastomere sind kompatibel, jedoch wird EPDM nicht für die Verwendung mit Mineralöl empfohlen.

³Elastomere können so entwickelt werden, dass sie die Kompatibilität mit spezifischen Kühlmitteln und dielektrischen Flüssigkeiten verbessern.

REFERENZEN

Beständigkeitsliste für Elastomere IV, Compass Publications, 2014.

Beständigkeitsliste für Kunststoffe, Compass Publications, 2000.

Beständigkeitsliste für Metalle und Metalllegierungen, Compass Publications, 1995.

ACHTUNG: Aufgrund der Vielzahl möglicher flüssiger Medien und Betriebsbedingungen können sich aus der Verwendung von CPC-Produkten unbeabsichtigte Auswirkungen ergeben, die außerhalb der Kontrolle von CPC liegen. Es liegt in der Verantwortung des Kunden, die Eignung der CPC-Produkte im Rahmen seiner eigenen Anwendungsbedingungen zu testen. Alle Risiken gehen zu Lasten des Käufers.

Confidence at every point of connection.

